



TITLE:

中粗粒質灰色低地土における良質
米栽培時の土壤窒素および施肥窒
素の動態と施肥技術(
Dissertation_全文)

AUTHOR(S):

廣川, 智子

CITATION:

廣川, 智子. 中粗粒質灰色低地土における良質米栽培時の土壤窒素およ
び施肥窒素の動態と施肥技術. 京都大学, 1994, 博士(農学)

ISSUE DATE:

1994-03-23

URL:

<https://doi.org/10.11501/3075961>

RIGHT:

中粗粒質灰色低地土における良質米栽培時の
土壌窒素および施肥窒素の動態と施肥技術

1994年

廣 川 智 子

中粗粒質灰色低地土における良質米栽培時の
土壌窒素および施肥窒素の動態と施肥技術

目次

| | | |
|-----|------------------|----|
| I | 緒言 | 1 |
| 1 | 研究の背景 | 1 |
| 2 | 関連する研究の概要 | 4 |
| 3 | 研究の目的 | 10 |
| II | 施肥窒素の利用率の変動とその要因 | 12 |
| 1 | 施肥窒素利用率の年度間の変動 | 12 |
| 2 | 日照と利用率 | 16 |
| 3 | ケイ酸資材の施用と利用率 | 23 |
| 4 | 田面水の降下浸透と利用率 | 28 |
| 5 | 施肥窒素量と利用率 | 31 |
| 6 | 土壌の種類と利用率 | 36 |
| 7 | 水稻の生育量と利用率 | 41 |
| 8 | 摘要 | 45 |
| III | 早期追肥窒素の動態と利用率 | 47 |
| 1 | 基肥と早期追肥窒素の土壌中の動態 | 47 |

| | |
|--|-----|
| 2 . 基肥および早期追肥窒素の水稲による吸収経過と生育に及ぼす影響 | 52 |
| 3 . 早期追肥窒素の利用率の向上 | 58 |
| 4 . 摘要 | 62 |
| IV 復帰田における施肥窒素および土壌窒素の水稲による吸収 | 65 |
| 1 . 復帰田の水稲の生育と施肥窒素の利用率 | 65 |
| 2 . 復帰田の無機化土壌窒素量 | 73 |
| 3 . 無機化土壌窒素の水稲による利用率 | 79 |
| 4 . 施肥窒素の有機化率 | 87 |
| 5 . 摘要 | 89 |
| V 富山県における無機化土壌窒素の実態とその水稲による吸収 | 91 |
| 1 . 無機化土壌窒素量とその変動 | 91 |
| 2 . 各種土壌における無機化窒素の水稲による利用率 | 118 |
| 3 . 摘要 | 129 |
| VI 水稲の目標窒素吸収量の設定 | 131 |
| 1 . 試験研究方法 | 131 |

| | |
|--|-----|
| 2 . 結 果 お よ び 考 察 | 132 |
| 3 . 摘 要 | 144 |
| VII 研 究 結 果 の 検 証 と 施 肥 技 術 へ の 応 用 | 146 |
| 1 . 各 種 ほ 場 で の コ シ ヒ カ リ に よ る 窒 素 吸 収 量 の 推 定 値 の 妥 当 性 | 146 |
| 2 . 研 究 結 果 を 技 術 へ 反 映 す る 例 と し て の 復 帰 田 で の 施 肥 設 計 | 151 |
| VIII 総 括 | 156 |
| IX 引 用 文 献 | 162 |

I. 緒言

1. 研究の背景

富山県の主要な稲作地帯は扇状地として展開した平野部にある。耕地の95%は水田であり、灰色低地土が耕地土壌の39%と最も多くを占めている。特徴的なのは、礫層が浅い所に出現する土壌が多いことで、0~60cmの深さから礫層の出現する中粗粒質土壌の分布割合は耕地土壌の30%にも達する³⁵⁾。これは北陸の他県ではグライ土の分布が最も多いのと対照的に、富山県の顕著な特徴となっている。

この中粗粒・礫質灰色低地土は、有効土層が15cm前後と薄く、陽イオン交換容量が $7\sim 8\text{ cmol}(+)\text{ kg}^{-1}$ 程度で、日減水深 $20\sim 30\text{ mm day}^{-1}$ 以上であるため漏水過多になりやすく、保肥力・保水力も弱く、秋落ちの危険が大きい。そのため、水稻栽培時に肥効の持続が期待できず、これまでは、窒素質肥料を追肥重点の施肥配分で対応してきた。しかし、近年は稚苗移植が大部分を占めるようになり、分けつ過多を招きやすくなった。また、品種は従来の強稈多収品種から耐倒伏性の弱いコシヒカリが主流となり、作付面積の70%近くに達している。こういった現状から、過繁茂や倒伏を防止して安定多収をあげるため、

高度な分施肥を開発することが求められている。さらに、近年繰返し異常気象に遭遇したことから、気象条件の変化に対応した施肥が求められている。以上のように、施肥技術の一層の高度化が求められている状況であるが、従来の施肥技術の基礎になっている考え方には以下に述べるような問題がある。

第1に、現在の施肥法では一定の窒素利用率を想定して設計されている。重窒素(^{15}N)トレーサー法によると、基肥窒素の利用率は20～40%、追肥窒素の利用率は26～80%と変動が大きい⁶¹⁾。従って、施肥技術を一層高度化させるためには、この変動要因を把握することが必要である。

第2に、富山県の慣行として、移植後1週間前後に施用している早期追肥は、利用率が数%と低く¹⁵⁾、その必要性が疑問視されている。そのため、早期追肥が水稻生育に及ぼす影響を明らかにし、その利用率を高める方法について検討することが必要である。

第3に、良質米の需要増が進行する中で、水田転作が増大しているため、耐肥性の弱いコシヒカリを復帰田(畑転換直後再び水稻栽培に戻した水田)で安定的に栽培する技術が求められている。復帰田におけるコシヒカリ栽培は、過繁茂や窒素吸収過多に陥り、下位節間が伸びて

倒伏しやすくなる。復帰田では土壌窒素無機化量が増加することは周知の事実であるが、施肥窒素や土壌窒素の利用率については必ずしも明確になっていない。これらの点を明らかにし、復帰田におけるコシヒカリの施肥技術を確立することは重要な課題である。

第4に、水稻が吸収する窒素の約60～70%を占める土壌窒素の行動に関してもさらに検討すべき課題がある。近年、土壌窒素の無機化量や無機化パターンを推定する手法が開発された。これらには吉野・出井⁹⁴⁾による「有効積算温度」、金野・杉原³³⁾の「基準温度変換日数」などの考え方がある。しかし、実際のほ場における土壌窒素の無機化量が年度によって変動するかどうかに関しての検討や、あらかじめ求めた特性値が土壌に固有の安定した値であるかどうかを検討した報告は少ない。施肥量を決定するには、これらの点を把握しておく必要がある。

第5に、無機化した土壌窒素の水稻による利用率についても問題が残されている。現状では、無機化土壌窒素は一定の利用率もしくは100%の利用率で吸収されるとみなす事例が多い。しかし、その方法が正しいかが必ずしも明確ではない。無機化土壌窒素量と水稻が実際に吸収した土壌窒素量の整合性に関する検討が必要であ

る。つまり、多数の報告は土壤窒素の無機化量と窒素無施用条件下での水稻の窒素吸収量を比較しているが、無窒素栽培時における水稻の窒素吸収量は施肥栽培時のそれと同一には考えられない。そのため、施肥栽培した状態で水稻による土壤由来の窒素吸収量を測定することが不可欠である。また、無機化土壤窒素の水稻による利用率の変動について検討したものは極めて少ないため、その変動要因についても検討する必要がある。

2. 関連する研究の概要

(1) 施肥窒素の利用率

施肥窒素の水稻による利用率の変動要因に関して検討した報告は少なくない。

施肥窒素の動向については、庄子ら⁶⁰⁾、安藤ら²⁾が経時的に測定している。また、気象要因が利用率の変動に及ぼす影響として、和田ら⁸⁰⁾は施肥後の天候について、高橋ら⁶⁵⁾は高温・低温について、TAら⁶⁴⁾は光量・温度について、MENGELら⁴⁰⁾は暗処理、低日照についてそれぞれ検討している。しかし、結果を気象状況と結びつけて生産現場における水稻による施肥窒素利用率や施肥法を考察するに至ってはいない。

土壤条件と施肥窒素利用率の関係を調査した報告も少

なくない。ほ場の管理と利用率に関しては、伊藤ら²⁴⁾、²⁵⁾はケイ酸石灰や稲わらや堆肥の施用について、山室⁸⁷⁾は堆肥や稲わらの施用に関して、長谷川ら¹³⁾は田面水深や中耕の有無と利用率並びに土壌中の施肥窒素の分布や流失についてそれぞれ検討している。前田³⁸⁾や山室⁸⁹⁾は、ほ場の透水性と施肥窒素の利用率について報告している。庄子ら⁶¹⁾は粘土鉱物の含量が高く、陽イオン交換容量が大きく、アンモニア化成量の小さい土壌では窒素利用率が高いことを報告している。一方、安藤ら^{1,4)}は土壌の理化学的性質と利用率との間には明らかな関係を認めていない。山室⁸⁷⁾は無機化窒素が多いと利用率が低くなると述べている。武田ら⁶⁶⁾によると、基肥窒素の利用率の変動要因は大部分が脱窒である。その他の変動要因として、和田ら⁸¹⁾は施肥時期に関して、山室⁸⁸⁾や安藤⁵⁾は施肥窒素の種類に関してそれぞれ報告している。

施肥窒素の利用率の変動要因についての報告は、上記のように多数あるが、未だ不明確な点も多く残されている。また、施肥設計をする側での、このような点についての認識が不十分であることから、利用率の平均値を当てはめて設計が行われているのが現状であり、これが適確な施用量を策定する上での限界になっている。そのた

め、この点に関する早急な検討が必要である。

(2) 早期追肥窒素の利用率

早期追肥を施用する慣行を持たない地域が多いため、利用率に関する報告は極めて少ない。茂木ら⁴⁵⁾は早期茎肥と名付けた移植2週間後に施用する肥料について検討している。これは、富山県の早期追肥の施用時期より1週間遅いが、そこでは14%という比較的高い利用率が示されている。

(3) 復帰田における無機化土壌窒素量および土壌窒素と施肥窒素の利用率の変動

復帰田で無機化土壌窒素量が増加することについては多数の報告^{27, 52, 59)}がある。また復帰田での水稻の窒素吸収量が増加する理由に関しては、下層土の窒素供給量の増加によって土壌由来窒素吸収量が増加したとの報告²⁸⁾や、基肥窒素の利用率が復帰田で高まったとの報告¹⁸⁾がある。これらの結果からは、輪換利用歴や土壌型の違いによる無機化土壌窒素量や窒素利用率の変動が予測されるが、変動要因の詳細に関する報告例は少ない。

(4) 無機化土壌窒素量とその変動要因

水田土壤窒素の無機化に関する研究は、広範に行われてきている。水稻生育期間中における無機化土壤窒素量および無機化パターンの解析は、金野・出井²⁴⁾がアンモニア生成量を有効積算温度で表現したのが最初である。彼等は、密栓湛水培養で生成するアンモニア態窒素量と、無窒素で栽培した水稻の窒素吸収量と土壤中の現存アンモニア量とを合計した値とを生育時期別に追跡した結果、両者の値がおおむね一致することを明らかにした。また、無機化土壤窒素量を決定する要因として、土壤の陽イオン交換容量、全窒素、交換性カルシウムおよび遊離鉄が関係していると結論づけた。一方、INUBUSHI²²⁾は、無機化土壤窒素量を決定する要因として、全窒素および粘土含量をあげている。さらに、金野・杉原³³⁾は土壤窒素の無機化を反応速度論的に解析した。また、高橋ら⁶⁵⁾

は水稻生育の温度に関する指標として提案された積算有効温度示数を用いて、水稻が吸収した肥料由来窒素量と土壤由来窒素量について検討している。武田ら⁶⁶⁾も積算有効温度示数を用いたアンモニア態窒素生成量と水稻の無機化土壤窒素吸収量が密接な関係にあることを報告している。

上記の解析結果を水田土壤の無機化窒素量の推定に利用しようとした例が、今泉・北村²⁰⁾、上野ら⁷⁷⁾、北田

ら³¹⁾の報告にある。これらにおいては、あらかじめ求めた土壌の窒素無機化に関する特性値に基づき無機化量を推定しているが、特性値が変化しないかどうかを確認した報告は、乾土効果に関するものを除くと見当らない。

鳥山ら⁷⁰⁾は湛水前の土壌水分含量から乾土効果の発現量を予測している。しかし、富山県の気象条件下では乾土効果が発現するほどに土壌は乾燥しないことに加えて、乾土効果によって有効化する窒素は短期間で無機化する。従って、ほ場に湛水後、移植までに1週間から10日程度を要している現状では、乾土効果の発現量のうち水稻が利用できる量を把握するには難点がある。また、鳥山らがpF4前後のほぼ一定値で乾土効果が発現すると述べているのに対して、上野ら⁷⁸⁾は乾土効果が発現し始めるpF値は2.36～4.42の範囲で、しかも土壌により異なっていると報告している。

(5) 無機化土壌窒素の水稻による利用率

無機化土壌窒素の水稻による利用率を測定した報告は少ない。吉野・出井⁹⁵⁾は無窒素栽培したポット水稻の窒素吸収量が無機化土壌窒素量とほぼ一致したと報告している。また、山本ら⁸⁶⁾も無窒素栽培水稻の窒素吸収量が無機化土壌窒素量と一致したとしているが、これに

は下層土からの窒素供給を考慮に入れていない。さらに、今泉・北村は²⁰⁾無機化土壌窒素の利用率を100%とした施肥設計モデルを報告しているが、100%とした根拠については触れていない。以上は、無機化土壌窒素の利用率を100%とした報告である。

無機化土壌窒素量と水稻の吸収量が一致しない例としては、吉野・出井⁹⁵⁾による報告がある。これによるとポット試験では100~68%、無窒素栽培ほ場においては139~68%という利用率となり、その原因として下層土が供給する窒素の寄与があることを指摘している。藤井ら⁸⁾は、下層土の窒素を考慮に入れずに、52~117%平均86%という利用率を報告している。北田ら³¹⁾は下層土を考慮に入れないで、灰色低地土では80~60%、グライ土では100%という利用率を報告している。しかし、グライ土では灰色低地土より以上に下層土の寄与を考えに入れる必要性が大きいものと考えられる。上野ら⁷⁷⁾は無機化土壌窒素の利用率として、生育の初期は40%、後期は70%という値を使用して施肥設計をしているが、この値の根拠については述べていない。これらは無機化土壌窒素量と吸収量が一致しなかったという報告である。以上をまとめると、無機化土壌窒素の利用率がどの程度であるか、定まった見解がないというのが現状である。さらに、無

機化土壤窒素の利用率の年度による変動を解析した報告は見当らない。

3. 研究の目的

本研究では、まず施肥窒素の利用率の変動の実態を明らかにした上で、利用率を変動させる個別要因について論議する。

第Ⅱ章では、利用率を変動させる要因を明らかにするため日照、降下浸透、ケイ酸石灰の散布、また施肥量、水稻の生育、土性に関して検討する。

第Ⅲ章では、早期追肥の施用後の動態を基肥窒素との関連で明らかにし、利用率を高める方策に関しても検討する。

第Ⅳ章では、今後も続くとみられる水田転作に対処するため、灰色低地土の復帰田での土壤窒素と施肥窒素の吸収について解明する。

第Ⅴ章では、吸収窒素の半分以上を占める無機化土壤窒素の実態を明らかにするため、富山県下の土壤の無機化窒素量や無機化パターンに関して、年度による変動、土壤の理化学的性質、特に粘土鉱物組成との関連性などを検討する。また、無機化土壤窒素量と水稻の土壤窒素の吸収量との関係を無窒素栽培条件下での水稻と重窒素

トレーサーを用いた窒素施肥栽培による水稲との両方について明らかにする。

第VI章では、富山県におけるコシヒカリの時期別窒素吸収量の目標値を設定する。

第VII章では、研究結果の検証と礫質灰色低地土の復帰田における施肥の改善方法について考察する。

Ⅱ 施肥窒素の利用率の変動とその要因

施肥窒素の利用率が変動することは、既往の研究によって認められているものの、変動を左右する要因が必ずしも明確ではなく、その上この点についての認識が不十分なため、一定の窒素利用率を仮定して施肥設計を行っているのが現状である。本研究では、礫質灰色低地土水田における施肥窒素の利用率の年度による変動の実態を明らかにするとともに、日照、ケイ酸石灰施用、降下浸透の有無、施肥量および施肥時の水稻の生育量による影響を検討し、各要因がその変動に与える重要性を評価した。

1. 施肥窒素利用率の年度間の変動

同一水田において、ほぼ一定の管理条件下で、数年間にわたり水稻による施肥窒素の利用率を測定し、利用率の年度間の変動の実態を明らかにする。

(1) 試験研究方法

富山県農業技術センター内ほ場210B号田で1986年から5年間にわたって水稻コシヒカリを供試して、重窒素ト

レーサー法を利用した栽培試験を実施した。1982年と1978年には越路早生を供試して同様の試験を行った。試験区は1972年以後には水稻を連作したほ場で、土壌型は礫質灰色低地土、国領統である。作土の理化学性は、全窒素率が 1.6 g kg^{-1} 、陽イオン交換容量が $8.3\text{ cmol}(+)\text{ kg}^{-1}$ 、pHは5.64、降下浸透は 2 cm day^{-1} 程度の排水良好な砂壤土である。

ほ場管理は、前年度稲わらは全量すきこみ、ケイ酸石灰は1982年4月と1986年4月に 100 g m^{-2} 、1989年10月に 200 g m^{-2} 施用した。前年には慣行の施肥栽培を行った。

施肥窒素の利用率を測定する方法は概ね共通で、重窒素硫安を使用して、以下のように行った。試験枠は無窒素栽培をしたほ場内に設けた。5月7日にほ場内へ、縦30cm、横30cm、高さ35cmの無底トタン枠を深さ20cm程度まで入れた。基肥として硫安を窒素成分で 4 g m^{-2} 、 K_2O （塩化カリウム）を 10 g m^{-2} 、 P_2O_5 （重焼燐）を 13 g m^{-2} 、手で全層施用した。枠内にコシヒカリの稚苗を1株4本植えて2株植付けた。移植の1週間後に早期追肥として窒素成分で 2 g m^{-2} 、穂肥として、幼穂形成期後3～4日目（出穂の約18日前）とそのさらに10日後の2回、窒素成分でそれぞれ 2 g m^{-2} 、実肥は出穂期の4～5日後に、窒素成分で 2 g m^{-2} 、硫安によって表層施用した。施用後1週間は枠に

第1表 水稻栽培概要

月/日

| 年度 | 品種 | 移植期 | 幼形期*1 | 出穂期 | 成熟期 | 施肥時期*2 | | | |
|------|-------|------|-------|------|------|--------|------|------|------|
| | | | | | | 早追*3 | 穂肥Ⅰ | 穂肥Ⅱ | 実肥 |
| 1990 | コシヒカリ | 5/ 7 | 7/13 | 8/ 3 | 9/ 6 | 5/14 | 7/17 | 7/25 | 8/ 8 |
| 1989 | " | 5/ 6 | 7/17 | 8/11 | 9/20 | 5/15 | 7/25 | 8/ 2 | 8/17 |
| 1988 | " | 5/ 9 | 7/19 | 8/13 | 9/22 | 5/13 | 7/22 | 8/ 4 | 8/12 |
| 1987 | " | 5/ 1 | 7/ 8 | 8/ 3 | 9/11 | 5/11 | 7/13 | 7/23 | 8/10 |
| 1986 | " | 5/ 6 | 7/18 | 8/13 | 9/18 | 5/13 | 7/22 | 8/ 1 | 8/18 |
| 1982 | " | 5/ 7 | 7/14 | | | 5/10 | | | |
| 1978 | 越路早生 | 5/12 | 7/11 | | | 5/23 | | | |

*1: 幼穂形成期

*2: 基肥は移植日に施用した。

*3: 早期追肥

第2表 各施肥の利用率の調査時期*1
月/日

| 年度 | 基肥 | 早期追肥 | 穂肥Ⅰ | 穂肥Ⅱ | 実肥 |
|------|-----|-------|-----|-------|-----|
| 1990 | 幼形期 | 幼形期*2 | 8/3 | 8/3 | 成熟期 |
| 1989 | 幼形期 | 幼形期 | 8/2 | 8/11 | 成熟期 |
| 1988 | 幼形期 | 幼形期 | 8/4 | 8/12 | 成熟期 |
| 1987 | 成熟期 | 成熟期 | | 8/3*3 | 成熟期 |
| 1986 | 成熟期 | 成熟期 | 8/1 | 8/18 | 成熟期 |
| 1982 | 成熟期 | 成熟期 | | | |
| 1978 | 成熟期 | 成熟期 | | | |

*1: 幼穂形成期、成熟期は第1表参照

*2: 幼穂形成期

*3: ⅠとⅡを同一の枠に施肥した。

第3表 施肥窒素の吸収利用率

(%)

| 年度 | 基肥 | 早期追肥 | 穂肥Ⅰ | 穂肥Ⅱ | 実肥 |
|------|------|------|------|------|------|
| 1990 | 28.3 | 3.5 | 63.4 | 69.7 | 71.5 |
| 1989 | 28.8 | 3.9 | 55.7 | 63.0 | 83.9 |
| 1988 | 23.3 | 3.0 | 53.9 | 60.8 | 30.8 |
| 1987 | 22.9 | 8.5 | | 51.8 | 61.0 |
| 1986 | 39.9 | 6.2 | 74.7 | 52.5 | 60.7 |
| 1982 | 22.3 | 18.5 | | | |
| 1978 | 17.3 | 8.5 | | | |
| 平均値 | 26.1 | 7.4 | 60.6 | | 61.6 |

設けた小穴に栓をして、枠内外の水が移動しないようにした。トレーサーとして6~30atom%の粉末の重窒素硫酸を使用した。枠の外には、田植機で栽植密度22株 m^{-2} に水稻を移植して、無窒素条件で栽培した。

各年の栽培概要は第1表の通りである。

枠内の水稻植物体を、第2表に示した時期に抜き取り、乾燥後粉碎して、硫酸分解、水蒸気蒸留法によって全窒素濃度⁵⁶⁾を、重窒素atom%は狩野ら²⁹⁾によるNIA-1発光分光分析計を用いて測定した。

(2) 結果

各時期の施肥窒素の利用度を第3表に示した。基肥窒素の利用度は年度によって17.3~39.9%の間で変動しており、7年間の平均値は26.1%であった。また、早期追肥窒素の利用度は3~18.5%の間で変動し、7年間の平均値も7.4%と低く、穂肥窒素の利用度は51.8~74.4%の間で変動し、5年間の平均値は60.6%と高く、実肥窒素の利用度の5年間の試験での平均値は61.6%と穂肥並みに高かったが、その値は30.8~83.9%の間に大きく変動していた。

(3) 考察

調査した施肥窒素の利用度を既往の結果と比較検討す

ると、基肥や穂肥の平均値では、ほぼ一致していた^{2, 30, 62, 80, 81}。しかし、個々の利用率にはかなりの年度間の変動が認められている。早期追肥窒素の利用率については比較すべき報告が見当たらないが、基肥、穂肥、実肥の利用率に比べてはるかに低く、一見効率の悪い施肥であるが、その動態及び必要性などについては次章において詳細に考察する。実肥についての報告は少ないが、和田ら⁸¹は細粒質ないし微粒質の土壌で利用率が25～36%と報告している。本研究における利用率はこれより高いが、それは中粒質という供試土壌の特性によるものと推察される。実肥の年度間の変動は早期追肥について大きく、栽培条件や気象などによる影響を受けやすいことがうかがえる。

利用率が年度により大きく異なっていて、最も利用率が低かった年には、利用率が高かった年の1/2以下しか施肥窒素が吸収されていなかった。従って、今後合理的な施肥管理法を確立してゆくためには、利用率の変動要因を把握することが重要な課題となる。

2. 日照と利用率

施肥窒素の利用率が年度により大きく変動することが

判明したため、その要因について解明する。まず、気象要因の中でも水稻の乾物生産を左右する日照の影響を検討する。

(1) 試験方法

前述の施肥窒素利用率の年度による変動に関する試験結果から、利用率と施肥後の日照時間との関係を考察する。そこで、施肥窒素の吸収期間を後記のように仮定し、それぞれの推定吸収期間の平均日照時間と施肥窒素利用率との関係を統計的に解析した。なお、富山県農業技術センターの気象観測値には欠測があったため、富山地方気象台⁷³⁾の地域観測所の観測値を使用した。富山県農業技術センターは当該観測所から約10km離れているが、両地点の日射量には $r=0.97\sim 0.92$ (1986~1991年の5月~8月の期間、 $n=120$)ときわめて高い相関関係が認められている。

1991年7月15日の1回目の穂肥施用時に、重窒素トレーサー処理枠の稲体を周辺群落とともに、寒冷紗1枚または2枚で遮光し、6.24atom%の重窒素硫安を窒素成分で 2 g m^{-2} 表層施用した。この状態では寒冷紗1枚区で約20%、寒冷紗2枚区で約40%遮光されていた(第4表)。処理は1区3連で行った。穂肥窒素の吸収量は施用後3日から7日

第4表 遮光処理と日射の透過率の関係

| 区 | 日射透過率(%) |
|-------|----------|
| 寒冷紗1枚 | 79.2 |
| 寒冷紗2枚 | 61.6 |

1990年7月13日調査

第5表 期間毎の平均日照時間
(hr.)

| 年度 | 移植－ 幼形期*1 | 早追－ 幼形期 | 穂肥施肥後 拔取り日まで*2 | 実肥施用後 6日間 |
|------|--------------|------------|-------------------|--------------|
| 1990 | 6.0 | 5.9 | 8.0 | 8.9 |
| 1989 | 4.3 | 4.5 | 7.1 | 4.2 |
| 1988 | 4.4 | 4.4 | 4.0 | 6.2 |
| 1987 | 6.6 | 6.2 | 3.5*3 | 8.9 |
| 1986 | 4.2 | 3.9 | 7.1 | 5.5 |
| 1982 | 7.4 | 9.0 | | |
| 1978 | 6.5 | 8.2 | | |

*1:幼穂形成期

*2:穂肥ⅠとⅡそれぞれの施肥後拔取り日まで

*3:Ⅰの穂肥施用後拔取り日まで

表6 遮光処理が穂肥窒素の動態に及ぼす影響

| 区 | 水稻の乾物重 (gm ⁻²) | 水稻の窒素吸収量 | | 穂肥窒素の動態 | | |
|-------|-------------------------------|----------------------------|-----------------------------|--------------|-------------|---------------|
| | | 全窒素 (gm ⁻²) | 穂肥窒素 (gm ⁻²) | 水稻利用率 (%) | 有機化率 (%) | 脱窒・流亡率 (%) |
| 寒冷紗1枚 | 589 | 6.43 | 1.19 | 59.5 | 7.5 | 33.0 |
| 寒冷紗2枚 | 601 | 7.28 | 1.15 | 57.4 | 4.6 | 36.1 |
| 無処理 | 691 | 8.92 | 1.38 | 69.0 | 16.2 | 14.9 |
| 差の有意性 | | | | * | NS | * |

*は5%水準で有意

程度で頭打ちとなるので^{15,81)}、施肥後8日目の7月23日に稲体地上部を抜き取り、乾燥後、微粉碎して同位体比測定用質量分析計ANCA-MSで、全窒素および重窒素atom%を測定した。

稲体抜き取り後、攪拌して均一にした枠内の作土の一部を採取し、石や残根を取り除き、風乾した後、直径2mmの篩を通し、微粉碎し、稲体と同じ方法で全窒素および重窒素atom%を測定し、無機態窒素が存在しないものとして施肥窒素の有機化率を算出した。

施肥量から水稻による吸収量と土壌への有機化量を差引いた残りの回収されなかった部分を脱窒・流亡量とした。本研究では、穂肥窒素の水稻地下部への吸収量や、土壌分析の前処理で篩上に残存した量は測定していない。つまり、同一ほ場における過去の測定例⁷²⁾によると、地下部が吸収した穂肥窒素は施肥量の2～3%程度で、ほとんど無視できた。

(2) 結果

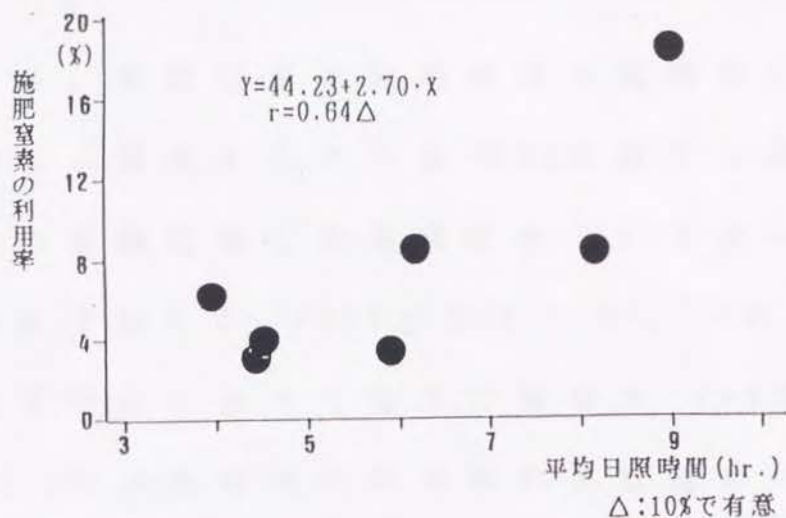
各施肥窒素の推定される吸収期間における平均日照時間を第5表に示した。なお、各施肥の吸収期間は以下のように推定した。基肥窒素は最高分けつ期までに吸収されるという報告が多い^{1,30,60)}。しかし、最高分けつ期

は施肥などの条件によって変動しやすい上に、時期の判定がやや困難なので、ここでは移植期から幼穂形成期までを吸収期間とみなした。早期追肥は6月中旬頃の有効分げつ期頃には吸収が終了しているとみられる。しかし、有効分げつ期の判定は穂数が決定した後になるので、調査の基準とするには不便が生ずる。そのため、早期追肥も基肥同様、移植期から幼穂形成期までを吸収期間と考えた。穂肥窒素の吸収は施用後3～7日以内とみられるので^{2,81)}第2表に示した施肥後から抜き取り日までを吸収期間とした。実肥窒素の利用率の調査は成熟期に行ったが、吸収は施肥後3～4日以内に終了したという既往の研究結果⁸¹⁾に基づいて、吸収期間を施肥後6日間と推定した。

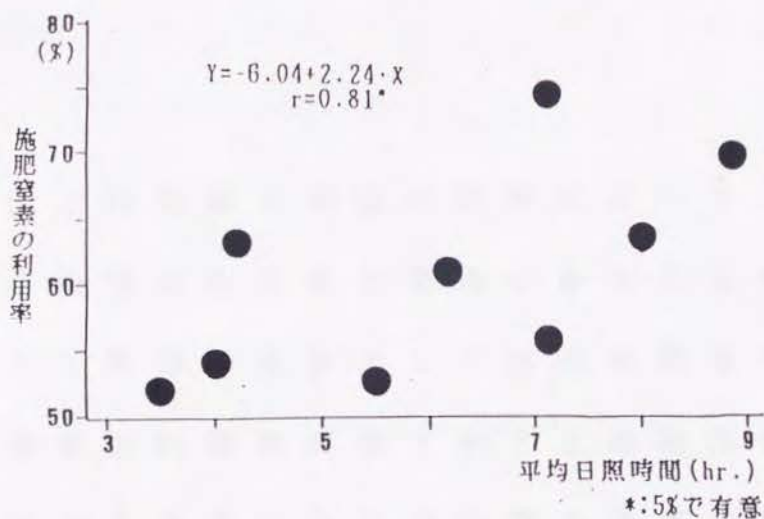
以上のような仮定をおいて、利用率と日照時間の関係を解析した結果、第1～3図に示すように早期追肥では $r=0.81$ ($n=7$)、穂肥では $r=0.64$ ($n=9$)、実肥では $r=0.80$ ($n=5$)のいずれも5～10%で有意な正の相関関係が得られた。なお、基肥については、相関係数が認められなかった。

回帰式から推察すると、平均日照時間が1時間増加すると、早期追肥や穂肥窒素の利用率は2～3%程度、実肥窒素の利用率は8%程度増加することになった。

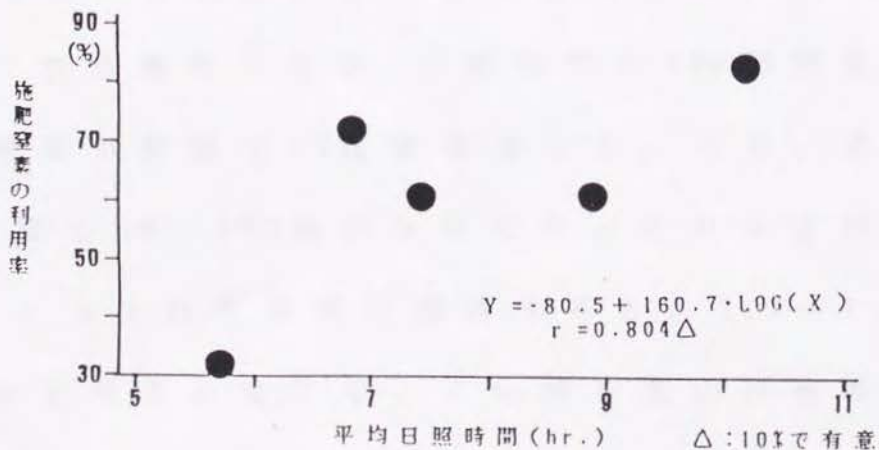
遮光処理と穂肥窒素の動向との関係は第6表に示した



第1図 早期追肥窒素の利用率と平均日照時間の関係



第2図 總肥窒素の利用率と平均日照時間の関係



第3図 実肥窒素の利用率と平均日照時間の関係

通りである。穂肥窒素の利用率は無処理区が69%であったのに対し、遮光することで59%に低下した。施肥窒素の土壌への有機化率も無処理区が16%であったのに対し遮光処理区では4.6~7.5%と低下した。一方、脱窒・流亡率は無処理区に比べて比率の数値で20%高まった。寒冷紗1枚と2枚の処理間で利用率に差は認められない。なお寒冷紗で被覆しても稲群落内の気温には変化が認められなかった。

(3) 考 察

日照時間と利用率の関係の解析によって、施肥窒素の利用率は、施肥後の日照と関係があることが明らかとなった。一方、寒冷紗を使用して遮光処理を行うことにより、穂肥窒素の利用率が低下するとの結果が得られた。ここで、自然条件下での日照時間の年度間変動の影響と遮光試験による日射量の変化が施肥窒素利用率に与えた影響の大きさを比較してみることにする。第2図に示した通り、自然条件下では日照時間が1時間増加すると穂肥の利用率が数値で3%程度増加した。一方、遮光試験では日射量を20~40%減少させたが、これを吉田・篠木の式⁹²⁾によって日照時間に換算すると、2.3~4.6時間程度の減少となる。そこで、この値を先の日照時間と利用

率の關係に当てはめると、利用率の数値で7～14%程度の低下に相当することになる。遮光処理による利用率の低下実測値は数値で約10%であり、両者はほぼ一致していた。このことから、年度間の変動から求めた利用率の変化を、遮光処理実験によって確認できたものといえる。

TAら⁶⁴⁾は、は種後4週目の水稻において、日射量の増加や気温の上昇によってアンモニウムイオンの吸収量が増加したことを報告している。このことから、日射量が多いと水稻の乾物生産が増加し、窒素吸収が活発になり、施肥窒素の利用率が向上するものと推定される。

本研究では、日照時間と基肥窒素の利用率の間には有意な關係が認められなかったが、この原因には苗質や移植直後の活着状況あるいは、気温の影響などが考えられる。この点に関して、基肥窒素や実肥窒素の利用率と吸収期間の平均気温との間には負の相関關係を認めている¹⁵⁾。なお、施肥窒素の利用率の調査時期と吸収期間との關係や、どの生育時期の気象が吸収利用率に最も影響を及ぼすかについては今後検討すべき課題である。

3. ケイ酸資材の施用と利用率

富山県では土壤を改良する目的でケイ酸資材の施用を

奨励しており、これが施肥窒素の利用率を変動させていることが考えられるので、ケイ酸資材の施用と窒素利用率について検討する。

(1) 試験研究方法

前述の手順に従って、重窒素トレーサー試験枠を設け、ケイ酸石灰200区には 200 gm^{-2} 、ケイ酸石灰400区には 400 gm^{-2} の粒状ケイ酸石灰(SiO_2 30%, MgO 2%, アルカリ分 40%)を基肥施用時にそれぞれ全層施用した。ケイ酸加里100区には 100 gm^{-2} の粒状ケイ酸加里(SiO_2 30%, MgO 3%, K_2O 20%)を穂肥施用直前に作土表面に施用した。なお、基肥の施用、移植方法、早期追肥の施用などは、II-1における方法と同様である。また、トレーサーによる穂肥窒素の利用率の測定は、II-2-2)の遮光処理試験と同様の方法で行った。さらに、各処理は1区2連で行った。

(2) 結果

ケイ酸資材の施用が穂肥窒素の動態に及ぼす影響については第7表に示した。ケイ酸石灰200区およびケイ酸石灰400区の穂肥窒素の利用率は53~54%で、無処理区の69.0%より低かった。一方、脱窒・流亡率は14.9%から34~38%に増加した。穂肥として施用した窒素の有機化率

第7表 ケイ酸石灰・ケイ酸加里施用が穂肥窒素の動態に及ぼす影響

| 区 | ケイ酸資 材施用量 (gm^{-2}) | 水稻の 乾物重 (gm^{-2}) | 水稻の窒素吸収量 全窒素 (gm^{-2}) | 穂肥窒素 (gm^{-2}) | 穂 肥 窒 素 の 動 態 水稻利用率 (%) | 有機化率 (%) | 脱窒・流亡率 (%) |
|-------|--------------------------------------|------------------------------------|---|------------------------------|-------------------------------|-------------|---------------|
| ケイ酸石灰 | 200 | 574 | 6.53 | 1.08 | 53.9 | 8.0 | 38.1 |
| " | 400 | 519 | 6.19 | 1.05 | 52.7 | 13.6 | 33.7 |
| ケイ酸加里 | 100 | 526 | 6.11 | 0.95 | 47.3 | 11.4 | 41.3 |
| 無処理 | | 691 | 8.92 | 1.38 | 69.0 | 16.2 | 14.9 |
| 差の有意性 | | | | | ** | NS | * |

**,*はそれぞれ1%,5%水準で有意

第8表 ケイ酸石灰・ケイ酸加里施用と
土壌のpHの変化

| 区 | (gm^{-2}) | pH |
|-------|----------------------|------|
| ケイ酸石灰 | 200 | 6.05 |
| " | 400 | 6.32 |
| ケイ酸加里 | 100 | 6.33 |
| 無処理 | | 5.64 |

第9表 降下浸透が穂肥窒素の動態に及ぼす影響

| 区 | 水稻の乾物重 (gm^{-2}) | 水稻の窒素吸収量 全窒素 (gm^{-2}) | 穂肥窒素 (gm^{-2}) | 穂 肥 窒 素 の 動 態 水稻利用率 (%) | 有機化率 (%) | 脱窒・流亡率 (%) |
|-------|--------------------------------|---|------------------------------|-------------------------------|-------------|---------------|
| 降下浸透有 | 562 | 8.32 | 0.48 | 69.4 | 23.5 | 7.7 |
| 降下浸透無 | 584 | 7.54 | 0.34 | 48.9 | 19.4 | 31.7 |
| 差の有意性 | | | | ** | NS | NS |

**は1%水準で有意

もやや低下したが、統計的に有意な差ではなかった。また、400区と200区との間には穂肥窒素の動向に有意差が認められなかった。各ケイ酸石灰施用区における施用窒素の利用率と脱窒・流亡率の間には5%水準で無処理区と有意差があることが認められた。

ケイ酸加里100区における穂肥窒素の利用率は47%で、無処理区の69%より低かった。脱窒・流亡率は41%と高く、無処理区の約3倍に達していた。施肥窒素の有機化率は無処理区よりやや低下したが有意な差ではなかった。穂肥窒素の利用率については、無処理区との間に1%水準で有意な差が認められた。また、穂肥の脱窒・流亡率については5%水準で有意な差が認められた。

(3) 考察

本試験から、ケイ酸石灰もしくはケイ酸加里の施用によって、施肥窒素の水稲への利用率が低下することが明らかにされた。最も大きな変化が生じたのは施肥窒素の脱窒・流亡率であり、無処理区では15%だったその値が、ケイ酸石灰あるいはケイ酸加里を施用した区では34~41%に上昇した。伊藤・飯村²⁴⁾は窒素ガスを直接捕捉して脱窒量を測定したが、その結果によると慣行水田の基肥窒素の脱窒率が16%だったのに対し、 200 gm^{-2} のケイ酸石

灰を18年間連用したほ場の脱窒率は44%に増加していた。この値は本研究で得られた脱窒・流亡率にほぼ等しいものである。

ケイ酸資材の施用によって多収を達成した事例がある一方で、ケイ酸石灰の施用の効果は明らかでなく、単に水稻の窒素過剰の害が緩和されるにすぎないとの報告もある²¹⁾。そこで、本研究の結果がケイ酸資材施用の効果の内容を明らかにする上で参考になると考えられる。

伊藤ら²³⁾は、中性から弱アルカリ性を示す土壤中硝化活性が高いことを報告している。第8表にケイ酸資材を施用した場合の土壌pHの変化を示した。これによると、ケイ酸石灰区やケイ酸加里区でpHの値が上昇しており、土壌の硝化活性の上昇が脱窒・流亡率の増加と関係があることをうかがわせている。

奥田・高橋⁴⁹⁾によると、ケイ酸含有率の高い水稻は光合成能力が増大し、通導組織の構造が健全になるため地上部から根部への酸素の供給が増加する。その結果、根の酸化力が旺盛となり、根圏域を酸化的にすると結論づけている。長谷部ら¹¹⁾は、ほ場に白金電極を挿入した直接法によって酸化還元電位の変化を測定し、ケイ酸石灰区の作土では6～7月におおよそ+200mVで推移し、慣行区より20mV程度酸化的に経過したことを報告している。

これらの事実と本研究の結果から、ケイ酸石灰の施用は土壌のpHを上昇させるとともに、土壌を酸化的にするため、施肥窒素の脱窒率が高まり水稻への利用率が低下するものと結論づけられる。

4. 田面水の降下浸透と利用率

田面水の降下浸透速度は、土壌中の施肥窒素の移動に影響を及ぼし、施肥窒素利用率の変動を支配する要因になりうると考えられる。そこで、降下浸透と窒素利用率の関係について検討する。

(1) 試験研究方法

降下浸透処理試験は、排水口付のφ2000ワグネルポットを用いて行った。排水を円滑にするため、ポットの下部に小石・砂を高さ5cm程入れ、その上に前記水田ほ場の作土を高さ25cmまで充填し、5月8日に水稻稚苗をポット当たり、4本植えて1株植付けた。窒素：リン酸：加里の比率が12:20:16の化成肥料によって、基肥では窒素成分として 4g m^{-2} を全層施用、早期追肥では窒素成分 2g m^{-2} を表層施用し、湛水状態で栽培した。7月15日の穂肥施用時から降下浸透量を 2cm day^{-1} （降下浸透有区）と 0cm day^{-1}

(降下浸透無区)に調節した試験を行った。穂肥としては、 6.24 atom\% の重窒素硫酸を窒素成分で 2 gm^{-2} 表層施用した。7月23日に稲体を採取るとともに、枠内の土壌を採取し、II-2-2)の遮光処理試験と同様の方法で分析した。なお、各処理は1区3連で行った。

(2) 結果

降下浸透処理の有無と穂肥窒素の動向の関係は第9表に示す通りである。降下浸透の有無は、稲体の乾物重や茎数、作土中での施肥窒素の有機化率に有意な影響を及ぼさなかった。しかし、稲体の窒素濃度や全窒素吸収量は降下浸透有区の方がわずかに高まり、施肥窒素の利用率が49%から69%まで上昇した。一方、脱窒・流亡率は逆に降下浸透有区で約32%から8%に低下した。

(3) 考察

施肥窒素の利用率と降下浸透の関係は、既往の報告では未だ明確にされているとはいえない。前田³⁸⁾のポット試験の結果によれば、 2 cm day^{-1} 程度の降下浸透のある区と全くない区で水稻の利用率に差はなく、有機化率が降下浸透のある区で高くなっていた。しかし、これは基肥を作土へ全層施用した場合で、表層施用を行った本研

究の場合とは状況が異なる。山室⁸⁹⁾は試験槽水田において、降下浸透のない湿田区と、有効茎数確保後約 2 cm day^{-1} の降下浸透処理をした乾田区を設けて試験を行い、湿田区は乾田区より穂肥窒素の利用率が高まることを報告している。しかし、湿田区と乾田区で水稻の生育経過にかなり差があるうえ、土壌も重粘質水田を急に乾田化したもので、本研究の場合とは条件が大きく異なっている。安藤ら²⁾は、平均日減水深 0.3 cm の透水不良水田における穂肥窒素の利用率は約 50% と低めで、水稻による吸収速度は、アンモニア態窒素が田面水から作土層へ移行するのに要する時間に左右されると結論づけている。この結論は本研究の結果と比較的よく一致している。

本研究では、降下浸透を変える必要上ボット栽培で試験したという制約があるが、降下浸透のある区の穂肥窒素の利用率が 69.3% で、同時期に測定したほ場試験での穂肥窒素の利用率の 69.0% とよく一致していた。また、ほ場の降下浸透量も 2 cm day^{-1} 程度であることから、本ボット栽培とほ場栽培の違いがもたらす影響は比較的小さく、両者の間に一致した結果が出たものと推定される。

一般に、水田における好適な減水深は $2\sim 3\text{ cm day}^{-1}$ であると言われている¹⁹⁾。田面に施用された施肥窒素が水稻根によって吸収されるためには、まず田面から土壌

中へ窒素が移行する必要がある、適度な降下浸透が表層施用した施肥窒素の利用率を高めると考えられており、本研究でもそのことが裏づけられた。

5. 施肥窒素量と利用率

本章Ⅱ・1において施肥窒素利用率の年度間の変動を測定したが、この際、施肥窒素量は基肥が 4g m^{-2} 、他の施肥はすべて 2g m^{-2} と一定であった。しかし、利用率を施肥設計に結びつけるには、施肥量の違いが利用率に影響するかどうかを明らかにする必要がある。そこで、以下に窒素施肥量の違いと利用率の関係を検討する。

(1) 試験研究方法

1989年に富山県農業技術センター内ほ場210B号田において、重窒素トレーサーを利用した枠試験で、 $30\text{atom}\%$ 重窒素硫酸を使用して試験した。

基肥窒素量は $2, 4, 6\text{g m}^{-2}$ の3段階とし、利用率の測定は幼穂形成期に抜き取った株について行った。中間追肥窒素量は1または 2g m^{-2} の2段階とし、施用10日後と20日後の抜き取り株について利用率を測定した。穂肥窒素量は $1, 2, 3\text{g m}^{-2}$ の3段階とし、穂肥窒素の吸収は施肥後3～7日

で頭打ちになる^{15, 81)}という既往の研究結果から、出穂18日前に施肥した区は施肥8日後に抜き取り、出穂10日前に施肥した区は施肥9日後に抜き取り、それぞれ利用率を測定した。実肥は1および 2 g m^{-2} の2段階とし、施用2日後と6日後の抜き取り株について利用率を測定した。これら以外の試験枠の設置、栽培方法、分析方法などについては前記の通りである。

(2) 結果

第10表に示すように、基肥窒素の利用率は19.4～21.9%で、施肥量の増加に伴ない、利用率がわずかながら上昇した。中間追肥窒素の利用率も、施肥量の増加に伴なって増加した(第4図)。一方、第11表に示した通り出穂前18日に施用した穂肥窒素の利用率は52.1～56.3%で、出穂前10日に施肥した穂肥窒素の利用率は63.0～73.3%であったが、これら2回の穂肥については、いずれも施肥量の増減と利用率の変化の間に明確な関係が認められなかった。実肥についても施肥量による利用率の変化は明らかではなかった(第12表)。

(3) 考察

穂肥と実肥では、窒素施肥量の増減と利用率の変動と

第10表 基肥窒素の施用量と利用率の関係

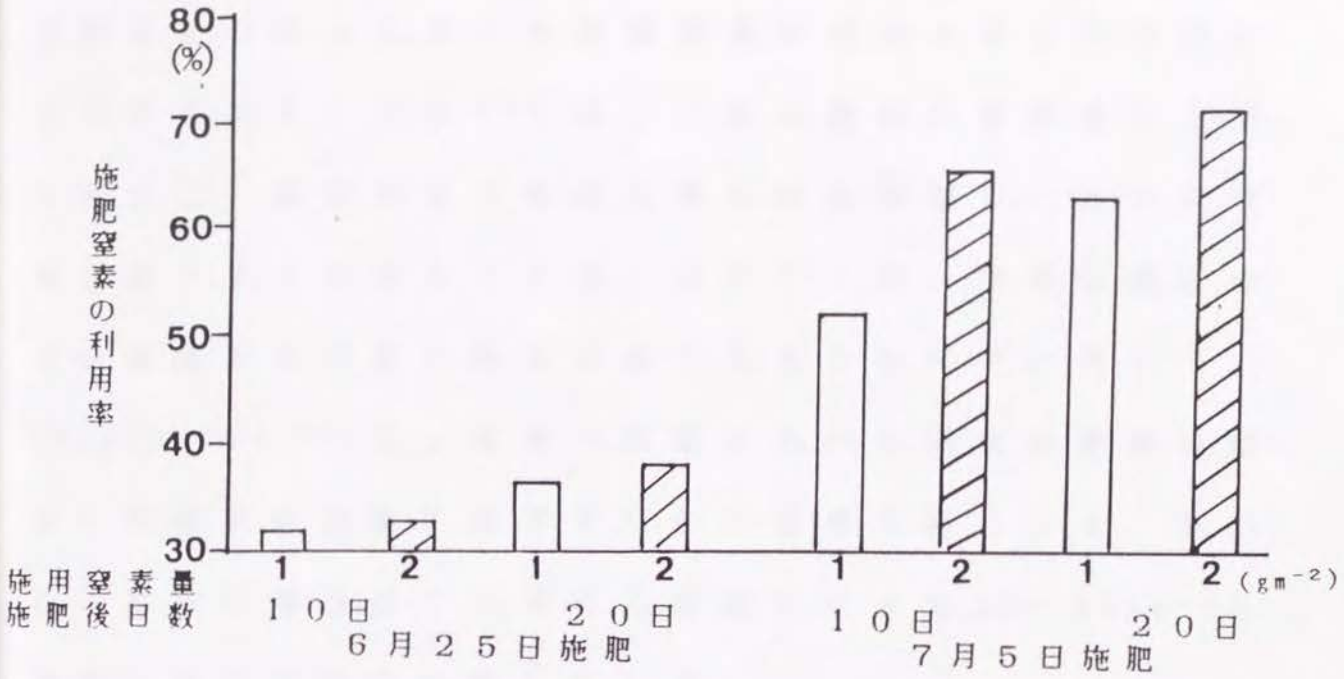
| 施用窒素量 (gm^{-2}) | 乾物重 (gm^{-2}) | 窒素濃度 (%) | 全窒素吸収量 (gm^{-2}) | 施肥窒素吸収量 (gm^{-2}) | 施肥窒素の利用率 (%) |
|-------------------------------|-----------------------------|-------------|--------------------------------|---------------------------------|-----------------|
| 6 | 341 | 1.35 | 4.61 | 1.31 | 21.9 |
| 4 | 284 | 1.44 | 4.09 | 0.83 | 20.6 |
| 2 | 270 | 1.33 | 3.59 | 0.39 | 19.4 |

(幼穂形成期調査)

第11表 穂肥窒素の施用量と利用率の関係

| 施用時期 | 施用窒素量 (gm^{-2}) | 調査時期 | 乾物重 (gm^{-2}) | 窒素濃度 (%) | 全窒素吸収量 (gm^{-2}) | 施肥窒素吸収量 (gm^{-2}) | 施肥窒素の利用率 (%) |
|----------------|-------------------------------|------|-----------------------------|-------------|--------------------------------|---------------------------------|-----------------|
| 7/25 (-18)* | 3 | 8/ 2 | 552 | 1.17 | 6.46 | 1.69 | 56.3 |
| | 2 | | 567 | 1.09 | 6.19 | 1.11 | 55.7 |
| | 1 | | 578 | 1.02 | 5.90 | 0.52 | 52.1 |
| 8/ 2 (-10) | 3 | 8/11 | 773 | 1.27 | 9.82 | 2.20 | 73.3 |
| | 2 | | 787 | 1.04 | 8.18 | 1.26 | 63.0 |
| | 1 | | 680 | 1.20 | 8.16 | 0.70 | 70.2 |

*:()内は出穂日を起算日とした日数



第 4 図 中間追肥の施用量と利用率の関係

第 1 2 表 実肥窒素の施用量と利用率の関係

| 施用時期 | 施用窒素量 (gm^{-2}) | 調査時期 | 乾物重 (gm^{-2}) | 窒素濃度 (%) | 全窒素吸収量 (gm^{-2}) | 施肥窒素吸収量 (gm^{-2}) | 施肥窒素の利用率 (%) |
|------|------------------------|------|----------------------|-------------|-------------------------|--------------------------|-----------------|
| 8/17 | 2 | 8/19 | 859 | 1.08 | 9.24 | 0.90 | 45.0 |
| | 2 | 8/23 | 1036 | 0.93 | 9.64 | 1.10 | 55.1 |
| | 1 | 8/19 | 816 | 1.07 | 8.74 | 0.41 | 40.3 |
| | 1 | 8/23 | 1048 | 0.89 | 9.36 | 0.62 | 61.5 |

茎葉と穂を合計して算出した。

の間には一定の関係が認められなかった。一方、基肥、中間追肥の場合には、施肥窒素量が増加すると利用率はやや高まった。小山³⁶⁾は、一般に肥料の窒素量を上げると流亡、脱窒および有機化量の割合が増し、逆に吸収率は低下すると述べている。吉田⁹³⁾は、窒素の吸収率は窒素施用量の低い時には高くなると述べている。

GREENWOODら⁹⁾は、各種の野菜において窒素施肥量を増すと利用率が急激に低下するとの結果を得ている。しかし、彼らの場合は、いずれも窒素レベルを $20 \sim 80 \text{ g m}^{-2}$ と極端に高い状態で比較している。

水稻において、深山⁴²⁾は施肥窒素量が特に多くない限り利用率がほぼ一定という差引法による検討結果を報告している。西沢ら⁴⁷⁾は、同様に差引法によって、基肥と穂肥では窒素量を増やすことで利用率が高まるが、中間追肥と実肥では窒素量が増加した場合に、利用率は変わらないか、やや低下すると報告している。これらを総合すると、適量の範囲内であれば施肥窒素の吸収利用率は施肥量の影響をほとんど受けず、むしろ施肥量が増加すれば利用率はやや高まる傾向があると考えられる。

以上の考察結果から、施肥の必要量の策定に当っては、利用率が決れば比例計算で施肥量を算出して差し支えないと結論づけられた。

6. 土 壌 の 種 類 と 利 用 率

これまでは礫質灰色低地土で試験を行ってきたが、富山県下には他の種類の土壌の水田もかなり分布していることから、本研究の結果を施肥設計に適用するに当たって、土壌型の違いが施肥窒素の利用率に及ぼす影響を調査しておく必要がある。ここでは、富山県下の代表的土壌で試験を行い、土壌の種類と利用率について、年度間の変動も考慮に入れて検討する。

(1) 試 験 方 法

第13表に示したのべ16ほ場において5年間にわたって、重窒素トレーサー法を利用した水稻栽培枠試験を実施した。試験区の設置、栽培方法やサンプリングおよび全窒素、重窒素atom%の測定法はⅡ-1と同様である。

(2) 結 果

施肥窒素の利用率を、土壌の種類別に第14表に示した通りであるが、基肥窒素の利用率には土壌間差がなかった。早期追肥窒素の利用率は、測定していないほ場も多く、平均値では黒ボク土の12.1%が他の土壌型より高かったが、変動が大きいため有意な差が認められなかった。

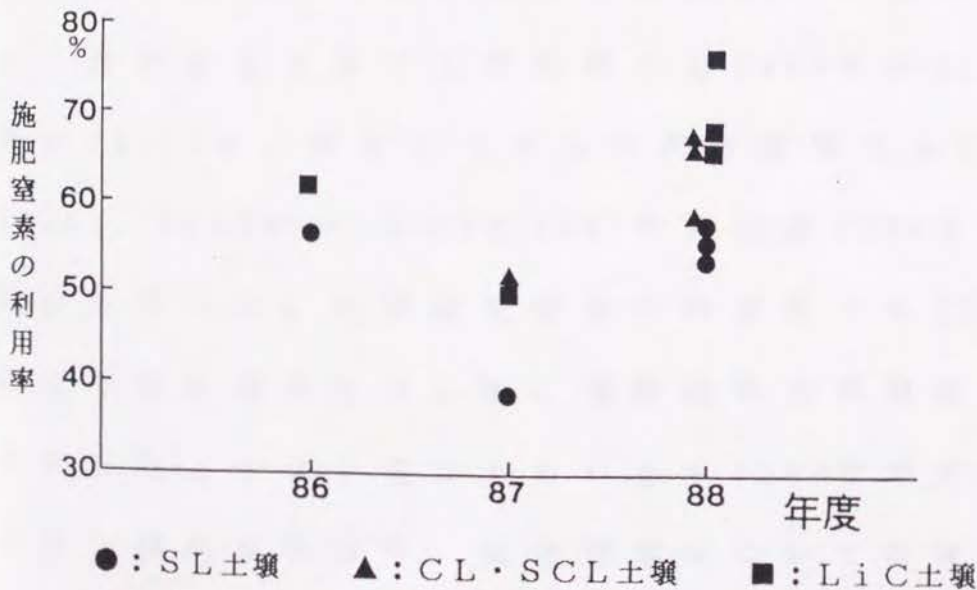
第13表 供試土壌の理化学性

| No. | 土壌型 | 試験 年度 | 場所 | 粒 径 組 成(%) | | | | 土 性 | 仮 比重 | 作 土 深(cm) |
|-----|--------------|----------|-----|------------|--------|---------|--------|--------|---------|--------------|
| | | | | 粗 砂 | 細 砂 | シル ト | 粘 土 | | | |
| 1 | 灰色 低地土 | 1990 | 農試 | 22.6 | 44.4 | 22.8 | 10.2 | SL | 1.00 | 16.7 |
| 2 | | 1989 | 農試 | 30.9 | 36.0 | 20.3 | 12.9 | SL | 1.00 | 17.9 |
| 3 | | 1988 | 農試 | 25.6 | 42.9 | 21.3 | 10.2 | SL | 1.00 | 17.0 |
| 4 | | " | 入善 | 37.0 | 31.6 | 20.4 | 10.3 | SL | 1.12 | 18.0 |
| 5 | | " | 黒部 | 44.9 | 29.5 | 17.0 | 8.6 | SL | 1.18 | 15.0 |
| 6 | | 1987 | 農試 | 25.6 | 42.9 | 21.3 | 10.2 | SL | 1.07 | 17.6 |
| 7 | | 1986 | 農試 | 25.6 | 42.9 | 21.3 | 10.2 | SL | 1.07 | 17.0 |
| 8 | グライ 土 | 1988 | 浜黒崎 | 19.7 | 31.3 | 30.4 | 18.6 | CL | 0.71 | 18.0 |
| 9 | | " | 小杉 | 11.2 | 36.4 | 25.0 | 27.4 | LiC | 0.75 | 17.0 |
| 10 | 黒 ボク 土 | " | 魚津 | 16.1 | 24.8 | 34.2 | 24.9 | CL | 1.07 | 13.0 |
| 11 | | " | 上市 | 13.9 | 29.1 | 33.3 | 23.7 | CL | 0.83 | 18.0 |
| 12 | | 1987 | 上市 | 18.8 | 24.0 | 37.8 | 19.4 | CL | 0.84 | 18.0 |
| 13 | 黄色 土 | 1988 | 大沢野 | 9.5 | 22.4 | 33.5 | 34.6 | LiC | 0.74 | 19.0 |
| 14 | | " | 八尾 | 41.4 | 20.6 | 19.9 | 18.1 | SCL | 0.89 | 19.0 |
| 15 | | 1987 | 大沢野 | 7.4 | 16.7 | 35.5 | 40.4 | LiC | 0.84 | 19.8 |
| 16 | | 1986 | 大沢野 | 7.4 | 16.7 | 35.5 | 40.4 | LiC | 0.84 | 19.8 |

第14表 施肥窒素の利用率(%)

| No. | 土壌型 | 基肥 | 早追 ^{*1} | 穂肥 | 実肥 | 試験年度 |
|-----|-----|------|------------------|------|------|------|
| 1 | | 28.3 | 3.5 | 67.1 | 71.5 | 1990 |
| 2 | 灰 | 20.6 | 3.9 | 59.4 | 55.1 | 1989 |
| 3 | 色 | 23.3 | 3.0 | 57.4 | 30.8 | 1988 |
| 4 | 低 | 34.1 | | 55.9 | 70.0 | " |
| 5 | 地 | 23.3 | | 59.2 | 73.7 | " |
| 6 | 土 | 22.9 | 8.5 | 38.8 | 61.0 | 1987 |
| 7 | | 39.9 | 6.2 | 56.8 | 60.7 | 1986 |
| 平均 | | 27.5 | 5.4 | 56.4 | 60.4 | |
| 8 | グ | 24.9 | | 67.6 | 66.1 | 1988 |
| 9 | イ | 27.7 | | 66.4 | 67.1 | " |
| 平均 | 土 | 26.3 | | 67.0 | 66.6 | |
| 10 | 黒 | 28.9 | | 65.9 | 78.0 | 1988 |
| 11 | ホ | 22.1 | 5.7 | 57.6 | 27.6 | " |
| 12 | ク | 32.3 | 18.5 | 51.9 | 37.1 | 1987 |
| 平均 | 土 | 27.8 | 12.1 | 58.5 | 47.6 | |
| 13 | 黄 | 29.1 | 4.6 | 76.7 | 74.4 | 1988 |
| 14 | | 25.7 | | 68.0 | 61.7 | " |
| 15 | 色 | 33.5 | 6.9 | 51.0 | 58.0 | 1987 |
| 16 | | 31.8 | 3.0 | 61.9 | 67.2 | 1986 |
| 平均 | 土 | 30.0 | 4.8 | 64.4 | 65.3 | |
| 平均 | | 28.0 | 6.4 | 60.1 | 60.0 | |

*1:早期追肥



第5図 土性の違いによる穂肥窒素の利用率

穂肥と実肥の窒素利用率はグライ土や黄色土で高く、灰色低地土と黒ボク土で低かったが、年度によって変動があるため、有意な差は認められなかった。

土壌型別の平均では差が認められなかったが、第14表に示した結果から、穂肥と実肥の窒素利用率は、細粒質土壌で中粗粒質より高い傾向がみられたので、同一年度において土性別に検討した。その結果、第5図に示したように、穂肥窒素の利用率が砂壤土(SL)では他の土性の土壌より低くなる傾向があった。それに対して、基肥、早期追肥、実肥の利用率には土性による差が認められなかった。

さらに、同一ほ場において年度間で検討すると、基肥窒素の利用率は灰色低地土である富山県農業技術センターほ場では1987年と1988年では約23%と同程度であったが、黒ボク土である上市ほ場では1987年が32.3%、1988年が22.1%で、黄色土である大沢野ほ場でも1987年が33.5%、1988年が29.1%と1987年の方が1988年より高い傾向がみられた。早期追肥窒素の利用率でも1987年が1988年より高い傾向を示した。穂肥窒素の利用率は、第5図に示したように土壌にかかわらず1987年の方が1988年より低い傾向があった。実肥窒素についてはほ場間の変動が大きく、年度による傾向が明らかではなかった。

(3) 考 察

土 壌 の 種 類 と 利 用 率 の 関 係 に つ い て 、 既 往 の 報 告 と 比 較 し て 考 察 す る 。 追 肥 窒 素 の 利 用 率 に つ い て 、 北 田 ら³¹⁾ は 灰 色 低 地 土 と グ ラ イ 土 の 間 で 差 が な い こ と を 指 摘 し て い る 。 彼 ら が 供 試 し た 灰 色 低 地 土 は 陽 イ オ ン 交 換 容 量 が $10\text{cmol}(+)\text{kg}^{-1}$ 以 上 あ る 埴 壌 土 (CL) が 主 で あ り 、 グ ラ イ 土 も 軽 埴 土 (LiC) が 主 で あ っ た 。 本 研 究 に お い て も 埴 壌 土 と 軽 埴 土 と の 間 に 差 が 認 め ら れ な い の で 、 こ の 点 で は 北 田 ら の 結 果 と 一 致 し て い る 。 深 山 ・ 岡 部⁴⁴⁾ は 、 穂 肥 窒 素 の 利 用 率 が 粗 粒 質 土 壌 で 中 ～ 細 粒 質 土 壌 よ り 高 め で あ り 、 そ の 理 由 と し て 千 葉 県 の 粗 粒 質 土 壌 が 湿 田 地 帯 に あ っ て 施 肥 窒 素 が 流 亡 し に く く 、 ま た 土 壌 窒 素 供 給 量 が 少 な く て 穂 肥 が 利 用 さ れ や す い こ と に よ る と 報 告 し て い る 。 一 方 、 富 山 県 の 粗 粒 質 土 壌 は む し ろ 乾 田 を 主 体 と す る も の で 、 減 水 深 の 大 き い 場 合 が 多 い 。 深 山 ら の 結 果 は 本 研 究 で 得 ら れ た 結 果 と み か け 上 矛 盾 す る が 、 そ の 背 景 に は こ の よ う な ほ 場 条 件 の 違 い が あ る も の と 推 定 さ れ る 。 さ ら に 、 山 室⁸⁷⁾ が 試 験 槽 内 で 行 っ た 試 験 で は 、 穂 肥 窒 素 の 利 用 率 が 砂 質 田 と 強 粘 質 田 の 間 で 差 が 認 め ら れ て い な い 。

以 上 の 点 と 穂 肥 窒 素 以 外 は 土 性 と 利 用 率 に 一 定 の 傾 向 が 認 め ら れ な か っ た こ と な ど か ら 考 え る と 、 現 時 点 で は

施肥窒素利用率に対する土性の影響は明らかでないと結論づけられる。

第5図に示した穂肥窒素の利用率は1988年には1987年より高かったが、穂肥吸収期間の日照時間の推定値は1988年が1987年より日平均で約2時間多かった。また、早期追肥窒素の利用率並びに黒ボク土および黄色土の基肥窒素の利用率は1987年の方が1988年より高くなったが、基肥・早期追肥の吸収期間の日照時間の推定値が1987年では1988年より高くなっていた。このように日照時間が長い条件下で施肥窒素の利用率が高まることは、Ⅱ-2の試験結果を裏付けるものである。

7. 水稲の生育量と利用率

本章の1と5の結果から、早期追肥、中間追肥、穂肥・実肥と水稲の生育時期が進行するにつれて、施肥窒素の利用率が高くなることが明らかにされた。しかし、稲体の生育量と穂肥窒素の利用率の関係のように、同一時期の生育量と利用率の関係については明確ではないので、以下その点に関して検討する。

(1) 試験研究方法

Ⅱ - 1 の試験で測定した穂肥窒素の利用率と、穂肥施用時の水稻の生育量との関係を統計的に解析した。

1988年に富山県農業技術センターほ場と第15表に示した富山県下の8地点のほ場に試験枠を設け、 2g m^{-2} ずつの穂肥を7月22日と8月4日の2回、同一枠に施用して、8月12日に抜き取り、Ⅱ - 1 に示した方法によって分析し、施肥時の生育量と窒素の利用率との関係を解析した。

どちらの解析にも、穂肥施用時に、稲体地上部を抜き取り、水稻の乾物重と窒素濃度を測定した。栽培条件および分析方法などは前記の通りである。なお、窒素吸収量は乾物重に窒素濃度を乗じて求めた。

(2) 結果

第16表は、穂肥施用時の水稻の乾物重、窒素濃度、窒素吸収量と穂肥窒素の利用率の関係を示したものである。窒素濃度と穂肥窒素利用率との間および乾物重や窒素吸収量との間には相関関係が認められなかった。また、第17表に示すように、利用率と窒素濃度との間および乾物重や窒素吸収量との間にも有意な相関関係は認められなかった。

(3) 考察

第15表 現地トレーサー試験の供試ほ場

| 地区 | 土壌 | 土性 | CECmol(+)kg ⁻¹ |
|-----|-----|-------|---------------------------|
| 入善 | 灰色 | SL | 7.5 |
| 黒部 | 低地土 | SL | 8.1 |
| 浜黒崎 | クライ | CL | 13.1 |
| 小杉 | 土 | L i C | 15.3 |
| 魚津 | 黒ボ | CL | 16.9 |
| 上市 | ク土 | CL | 20.7 |
| 大沢野 | 黄色 | L i C | 21.0 |
| 八尾 | 土 | SCL | 38.6 |

第16表 穂肥施用時の水稻の生育と穂肥窒素の利用率の関係

| 年度 | 乾物重 (gm ⁻²) | 窒素濃度 (%) | 窒素吸収量 (gm ⁻²) | 利用率 (%) |
|-------|----------------------------|-------------|------------------------------|------------|
| 1990 | 620 | 1.04 | 6.45 | 63.4 |
| " | 774 | 1.06 | 8.18 | 69.7 |
| 1989 | 429 | 1.19 | 5.10 | 55.7 |
| " | 567 | 1.09 | 6.19 | 63.0 |
| 1988 | 424 | 1.08 | 4.58 | 53.9 |
| " | 711 | 1.08 | 7.68 | 60.8 |
| 1987 | 526 | 1.13 | 5.94 | 51.8 |
| 1986 | 345 | 1.31 | 5.24 | 74.4 |
| " | 765 | 1.07 | 8.16 | 52.5 |
| 相関係数* | -0.06 | 0.38 | 0.10 | |

*:利用率との相関係数

農試210B号田

第17表 穂肥施用時の水稻の生育と穂肥窒素の利用率の関係

| 地区 | 乾物重 (gm ⁻²) | 窒素濃度 (%) | 窒素吸収量 (gm ⁻²) | 利用率 (%) |
|------|----------------------------|-------------|------------------------------|------------|
| 入善 | 273 | 1.55 | 4.23 | 55.9 |
| 黒部 | 395 | 1.62 | 6.40 | 59.2 |
| 農試 | 424 | 1.08 | 4.26 | 53.9 |
| 農試 | 711 | 1.08 | 7.68 | 60.8 |
| 浜黒崎 | 329 | 1.31 | 4.31 | 67.6 |
| 小杉 | 231 | 1.56 | 3.60 | 66.4 |
| 魚津 | 275 | 1.40 | 3.85 | 65.9 |
| 上市 | 202 | 1.56 | 3.15 | 57.6 |
| 大沢野 | 366 | 1.64 | 6.00 | 76.7 |
| 八尾 | 222 | 1.32 | 2.93 | 68.0 |
| 相関係数 | -0.15 | 0.29 | 0.04 | |

品種:コシヒカリ

(1988年)

注)農試のデータは第3表に記した試験で得られたものである。

本試験の結果では、施肥時の水稻の生育量と施肥窒素利用率の間に有意な関係は認められなかった。これは穂肥施用時の水稻生育と窒素利用率の関係解析のように、異なる年度間にまたがるデータを比較する場合には、施肥後の気象条件や土壌条件の違いなどの影響が入り込むためである。また、同一年度で異なる地点間の比較をする場合には、土壌条件の差などが影響するために、関係が明確に表れないことが考えられる。

深山・岡部⁴⁴⁾は幼穂形成期の水稻の窒素保有量と穂肥窒素の利用率の関係を差引法で検討し、粗粒質(S,SL)土壌では両者の間に関係はなく、また細～中粒質(LiC,L,SCL)土壌では窒素保有量が 7gm^{-2} を越えた場合に利用率が低下するが、 $5.5\sim 7\text{gm}^{-2}$ の範囲では明確な関係は認められないと結論づけている。本研究で供試したLiC,L,SCL土壌における窒素保有量の最高値は 6.4gm^{-2} であり、水稻の生育量と施肥窒素の利用率との間に関係が認められず、この深山らの結果と一致していた。

前述のII-5における中間追肥窒素の利用率は、6月25日の施用で30～40%であった。7月5日施用で60%～70%となり、穂肥窒素の利用率と同程度まで高まった。7月5日以後も稲体の生育量は増加を続けるが、施肥窒素の利用率がほぼ横ばいということから、生育量が利用率に及

ぼす影響は、7月初めの最高分げつ期の頃に頭打ちになると推定された。以上のことから、7月以降では水稻の生育量が施肥窒素の利用率に及ぼす影響は小さいものと結論づけられる。

8. 摘要

水稻コシヒカリ栽培時における施肥窒素の利用率の変動要因に関して検討し、次のことを明らかにした。

(1) 5～7年間にわたって施肥窒素の水稻による利用率を測定したところ、年度間では基肥が17～40%、早期追肥が3～19%、穂肥が52～74%、実肥が31～84%の範囲で変化し、各施肥窒素の利用率の年度による変動が大きいことが明らかとなった。

(2) 施肥後の日射量を寒冷紗被覆によって遮光すると、穂肥窒素の利用率が低下した。そして、日射量の減少に伴って土壌への有機化率も低下し、脱窒・流亡率が上昇した。また、施肥窒素の利用率と施肥後の自然条件下における平均日照時間との間に、基肥を除き正の相関関係が認められた。

(3) ケイ酸石灰あるいはケイ酸加里の施用は、穂肥窒素の脱窒・流亡率を無施用区の2～3倍に増加せしめ、利用率を大きく低下させた。

- (4) 田面水の降下浸透が 2 cm day^{-1} 程度の場合、降下浸透のないほ場と比較して、脱窒・流亡率は大きく低下したのに対して、穂肥窒素の利用率は約50%から70%程度に増加した。
- (5) 基肥窒素が $2\sim 6\text{ gm}^{-2}$ 、中間追肥・穂肥・実肥窒素については $1\sim 3\text{ gm}^{-2}$ の範囲では、施肥窒素の吸収利用率は施肥量の影響をほとんど受けなかった。
- (6) 施肥窒素の利用率に土壌型による差があるとは認められなかった。穂肥窒素の利用率は、軽塩土(LiC)や塩壌土(CL)では砂壌土(SL)に比べて高い傾向がみられた。
- (7) 穂肥施用時の水稻の生育量と窒素の利用率の間に有意な関係は認められず、最高分けつ期以後になれば、水稻の生育量が施肥窒素の利用率に及ぼす影響が小さいものと推定された。

Ⅲ 早期追肥窒素の動態と利用率

富山県の水稲栽培指針では、移植後1週間頃に水稲の活着促進、早期茎数確保のために、基肥の半量程度の早期追肥を施用することになっている。しかし、前章Ⅱ-2で述べたように、この早期追肥は利用率が低く、利用率の年度間の変動も大きい。また、基肥施用後間もなく施肥することの必要性については疑問とする声もある。さらに、早期追肥を施用しない指導をしている県も多いため、利用率などに関する報告例は少ない。そこで重窒素硫安を使用し、基肥窒素の動きとの関連で早期追肥窒素の施用後の動態と早期追肥が水稲生育初期に果たす役割について考察した。加えて、早期追肥窒素の利用率を向上させる方策についても検討した。

1. 基肥と早期追肥窒素の土壌中の動態

本章では、早期追肥の利用率が低いことの原因を究明するため、移植前に全層施用する基肥と、移植後間もなく表層施用する早期追肥の土層内における動態を把握する。

(1) 試験研究方法

1991年に富山県農業技術センターほ場210B号田で試験した。土壌の主要な理化学性は第18表に示す通りである。ほ場は降下浸透量が 2 cm day^{-1} 程度の排水良好な砂壤土(SL)である。

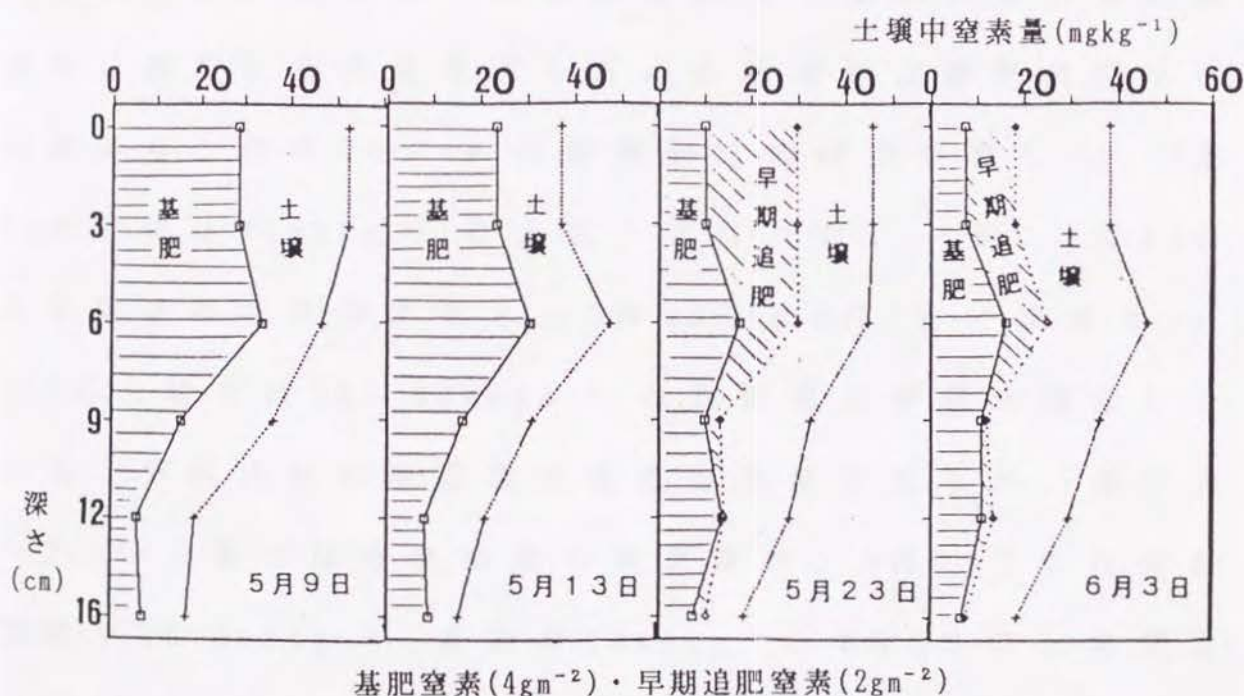
基肥窒素と早期追肥窒素の土壌中の動態は、ほ場に $30 \times 30\text{ cm}$ 、高さ 35 cm の無底トタン枠を深さ 20 cm まで挿入して、以下のように重窒素硫酸を施用し、裸地状態で調査した。

基肥窒素については、5月7日に窒素成分で 4 gm^{-2} の $30\text{ atom}\%$ 重窒素硫酸を、作土全層に肥料が行き渡るように攪拌した後、内径 5.79 cm 、高さ 16 cm の無底塩ビ管を上辺が地表面にあるように垂直に枠内に挿入した。5月9日から7月3日までほぼ10日毎に、塩ビ管を中に存在する土壌ごと抜き取り、 3 cm 毎の土層に切り分けて、アンモニア態窒素量と重窒素 $\text{atom}\%$ を測定した。 $100\text{ g kg}^{-1}\text{ KCl}$ 溶液で抽出し、水蒸気蒸留法によってアンモニア態窒素量を定量後、同位体比測定用質量分析計ANCA-MSで重窒素 $\text{atom}\%$ を測定した。塩ビ管を抜き取った跡にはほ場の土を補填し、地温などが変化しないようにした。

早期追肥窒素の土壌中の動態は以下のように測定した。基肥窒素として 4 gm^{-2} の非ラベル硫酸を作土層に施用し

第 1 8 表 供試土壤の理化学性

| | 粒粗 | 径細 | 組シルト | 成粘土 | 土性 | C E C | C a | Mg | C a Mg 飽和 | 全炭素 | 全窒素 |
|-----|-------|-------|------|-------|----|----------------------------|-----|------|-----------------|------|------|
| | 砂 (%) | 砂 (%) | (%) | 土 (%) | | (cmol(+)kg ⁻¹) | | | (%) | (%) | (%) |
| 作 土 | 22.6 | 44.4 | 22.8 | 10.2 | SL | 8.0 | 3.3 | 0.69 | 49.4 | 1.88 | 0.16 |
| 下層土 | 29.7 | 38.5 | 21.9 | 9.9 | SL | 6.9 | 3.4 | 0.66 | 59.1 | 1.77 | 0.14 |



第 6 図 施肥窒素の土壤中の動態

た後、基肥試験区と同様に塩ビ管を挿入した。基肥施用7日後の5月13日に窒素成分で 2gm^{-2} の15.6atom%重窒素硫酸を枠内の表層に、100mlの水溶液にしてムラのないように散布して施用した。10日毎に塩ビ管を中の土壌ごと抜き取って、基肥試験区と同じ方法で測定した。施肥および測定の期間中は常時水深3~4cmの湛水状態を保った。いずれの区も2連で試験を行った。

(2) 結果

第19表に、基肥と早期追肥窒素の土層別の存在量を経時的に測定した結果を示した。基肥窒素は施肥後の早い時期から、深さ0~3cmの表層部での減少が著しく、5月23日以降は 10mgkg^{-1} 乾土以下となった。一方、5月13日に早期追肥を施用すると、5月23日と6月3日には深さ0~6cmの土層では $20\sim 30\text{mgkg}^{-1}$ の施肥由来窒素が残存していた。早期追肥の施用量は基肥の半量であるが、深さ0~3cmの土層では施肥由来の窒素量が、5月23日には早期追肥が 21.2mgkg^{-1} 、基肥が 10mgkg^{-1} 、6月3日には早期追肥が 10.1mgkg^{-1} 、基肥が 9.6mgkg^{-1} それぞれ残存していた。従って、第6図に示すように表層では早期追肥窒素の残存量が基肥窒素のそれを上まわっていた。

第19表 基肥窒素と早期追肥窒素の土壤中の動態 (mgkg⁻¹乾土)

| 調査 月日 | 層位 (cm) | 現存 窒素量 | 施肥由来 基肥 | 窒素量 早期追肥 | 土壤由来 窒素量 |
|----------|------------|-----------|------------|-------------|-------------|
| 5/ 9 | 0- 3 | 52.5 | 27.9 | | 24.6 |
| | 3- 6 | 46.8 | 28.9 | | 17.8 |
| | 6- 9 | 36.4 | 19.8 | | 16.6 |
| | 9-12 | 18.8 | 4.0 | | 14.8 |
| | 12-16 | 17.1 | 4.5 | | 12.5 |
| 5/13 | 0- 3 | 36.9 | 27.3 | | 9.6 |
| | 3- 6 | 47.5 | 38.0 | | 9.5 |
| | 6- 9 | 30.8 | 18.9 | | 11.9 |
| | 9-12 | 20.8 | 12.9 | | 7.9 |
| | 12-16 | 15.2 | 8.1 | | 7.0 |
| 5/23 | 0- 3 | 50.2 | 10.0 | 21.2 | 18.9 |
| | 3- 6 | 46.3 | 15.3 | 9.7 | 21.3 |
| | 6- 9 | 37.7 | 9.0 | 2.4 | 26.3 |
| | 9-12 | 29.0 | 12.3 | 1.0 | 15.8 |
| | 12-16 | 18.1 | 6.2 | 1.7 | 10.2 |
| 6/ 3 | 0- 3 | 37.6 | 9.6 | 10.1 | 17.8 |
| | 3- 6 | 47.5 | 17.2 | 9.2 | 21.1 |
| | 6- 9 | 34.9 | 13.7 | 1.8 | 19.5 |
| | 9-12 | 36.7 | 12.1 | 1.7 | 22.8 |
| | 12-16 | 20.3 | 7.1 | 1.8 | 11.3 |
| 6/13 | 0- 3 | 24.9 | 7.1 | 6.6 | 11.2 |
| | 3- 6 | 48.4 | 14.1 | 10.8 | 23.6 |
| | 6- 9 | 51.8 | 13.9 | 6.8 | 31.1 |
| | 9-12 | 44.0 | 12.2 | 2.9 | 28.9 |
| | 12-16 | 35.1 | 10.3 | 1.6 | 23.2 |
| 6/23 | 0- 3 | 19.1 | 6.1 | 3.6 | 9.4 |
| | 3- 6 | 40.9 | 10.3 | 7.6 | 23.1 |
| | 6- 9 | 40.0 | 11.1 | 4.0 | 24.8 |
| | 9-12 | 36.3 | 9.8 | 2.0 | 24.6 |
| | 12-16 | 16.9 | 6.5 | 1.1 | 9.3 |
| 7/3 | 0- 3 | 13.9 | 5.8 | 1.6 | 6.4 |
| | 3- 6 | 36.8 | 11.3 | 5.3 | 20.2 |
| | 6- 9 | 41.9 | 13.4 | 4.4 | 24.1 |
| | 9-12 | 42.4 | 12.6 | 3.0 | 26.8 |
| | 12-16 | 26.6 | 8.2 | 1.7 | 16.7 |

(3) 考 察

全層施用した基肥窒素は、施用後16日で深さ0～3cmの作土表層部では残存量が 10mgkg^{-1} 乾土以下に減少していた。関矢ら⁵⁸⁾は、降下浸透量が 2.4cmday^{-1} の沖積火山性壤土において、基肥窒素が下層へ集積すると報告している。一方、長谷川ら¹³⁾によれば、降下浸透量が $0.6\sim 0.7\text{cmday}^{-1}$ の強粘質グライ土では施肥窒素の土壌中での移行はきわめて少ない。しかしながら、土壌によって施肥窒素の移行の程度が異なるので、中粗粒質土壌では下方への移行速度が大きいことが考えられる。また、本研究では試験の都合上、移植当日に基肥を施用したが、農家の施肥管理は移植の3～7日程度前に基肥を施用するのが慣例なので、農家のほ場では基肥窒素の表層からの移動がより一層進行するものと考えられる。

2. 基肥および早期追肥窒素の水稻による吸収経過と生育に及ぼす影響

早期追肥と基肥窒素の土壌中における動態が把握できたので、その結果と施肥窒素の水稻への吸収経過とを対比させて検討する。また、早期追肥の水稻の生育に及ぼす影響をほ場栽培条件で確認する。

(1) 試験研究方法

基肥試験区には、5月7日に15.6atom% 重窒素硫安を窒素成分で 4g m^{-2} 、作土層に全層施用した。早期追肥は5月13日に窒素成分で 2g m^{-2} を非ラベル硫安で施用した。稲体は5月23日から7月10日まで10日毎に抜き取り、基肥窒素の利用率を測定した。

早期追肥試験区には、5月7日に非ラベル硫安を窒素成分で 4g m^{-2} 施用した。5月13日に31.2atom% 重窒素硫安を表層施用した。稲体を基肥窒素区と同一日に抜き取り、早期追肥窒素の利用率を測定した。その他の処理と手順は前章Ⅱ-1の場合と同様である。また、Ⅱ-2-2)の遮光処理試験と同様の方法によって、全窒素および重窒素atom%を測定した。

早期追肥の有無による水稻の生育量の違いについては、1991年に富山県農業技術センターほ場210号田において試験を行った。4月23日に $\text{N}:\text{P}_{205}:\text{K}_{20}$ が4:10:8 g m^{-2} になるように基肥を化成肥料を用いて施用した。5月7日に田植機による水稻コシヒカリの稚苗移植を行い、5月13日に各25aの2区に分けて基肥と同じ化成肥料によって基肥の半量の早期追肥を施用した区と、もう一方は早期追肥無施用の区を設定して、地上部の生育経過を各区2連で調査した。

(2) 結果

基肥窒素の水稲への利用率は第20表に示した通りで、5月23日が1.7%、6月3日が4.3%と低く、6月中旬頃より吸収が増加していた。幼穂形成期である7月10日の調査では、利用率が30.5%、土壌中残存率が34.0%、回収不能すなわち脱窒・流亡率が35.5%であった。

早期追肥窒素の水稲への利用率は、第21表に示したように5月23日が2.0%、6月3日が6.8%で、生育初期には基肥窒素より利用率が高く、移植後水稲が吸収した窒素量に占める早期追肥由来窒素の比率が全吸収窒素の1/3程度であった。しかし、早期追肥窒素の利用率は基肥窒素の利用率が増加する6月中旬頃には頭打ちになっていた(第7図)。幼穂形成期の7月10日時点の調査では、早期追肥窒素の利用率が14.6%、土壌中残存率が26.8%、脱窒・流亡率が58.5%であった。

早期追肥の有無による水稲の生育量の違いを第22表に示した。草丈の差はわずかであったが、茎数の差が大きかった。富山県の栽培指針⁷⁵⁾では、6月3日には270本 m^{-2} 程度の茎数確保が目標になっている。早期追肥施用区はこれを、ほぼ達成しているが、無施用区では目標を下回っていた。

第20表 基肥窒素*1の動態

| 調査時期 | 水 | | 稲 | | | 施肥窒素の利用率 (%) | 水中の施肥窒素吸収量の比率 (%) | 施肥窒素の土壌中残存量 (g ^m - ²) | 施肥窒素の土壌中残存率 (%) | 脱窒・流亡率*2 (%) |
|------|--------------------------------------|-------------------------------------|----------|---|---|--------------|-------------------|--|-----------------|--------------|
| | 乾物重 (g ^m - ²) | 茎数 (本 ^m - ²) | 窒素濃度 (%) | 全窒素吸収量 (g ^m - ²) | 施肥窒素吸収量の (g ^m - ²) | | | | | |
| 5/23 | 4.0 | 89 | 3.81 | 0.15 | 0.07 | 1.7 | 61.3 | | | |
| 6/ 3 | 11.7 | 150 | 3.54 | 0.43 | 0.17 | 4.3 | 48.8 | | | |
| 6/13 | 55.0 | 333 | 3.24 | 1.79 | 0.64 | 16.0 | 36.6 | 1.32 | 33.9 | |
| 6/23 | 168.8 | 550 | 2.35 | 3.97 | 1.13 | 28.3 | 28.8 | 1.36 | 34.0 | |
| 7/ 3 | 318.6 | 600 | 1.53 | 4.87 | 1.32 | 32.9 | 27.3 | 0.94 | 23.6 | |
| 7/10 | 435.7 | 489 | 1.14 | 4.97 | 1.22 | 30.5 | 24.8 | 1.36 | 34.0 | 35.5 |

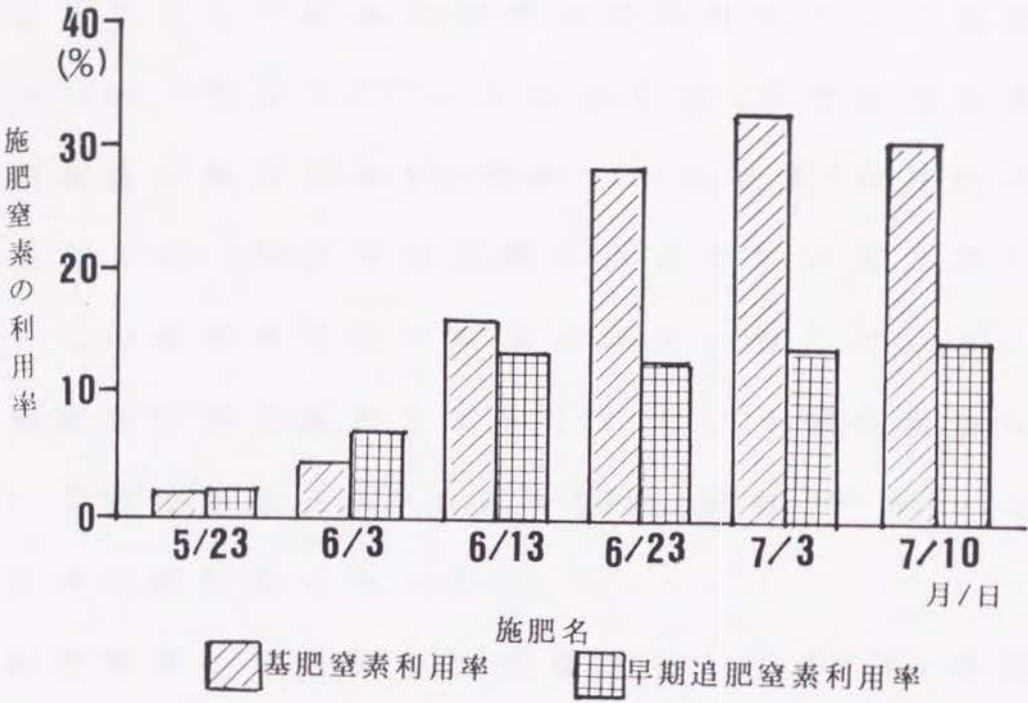
*1:5月7日 4N^gm⁻²施肥

*2:100 - (施肥の利用率 + 残存率)

第21表 早期追肥窒素*の動態

| 調査時期 | 水 | | 稲 | | | 施肥窒素の利用率 (%) | 水中の施肥窒素吸収量の比率 (%) | 施肥窒素の土壌中残存量 (g ^m - ²) | 施肥窒素の土壌中残存率 (%) | 脱窒・流亡率 (%) |
|------|--------------------------------------|-------------------------------------|----------|---|---|--------------|-------------------|--|-----------------|------------|
| | 乾物重 (g ^m - ²) | 茎数 (本 ^m - ²) | 窒素濃度 (%) | 全窒素吸収量 (g ^m - ²) | 施肥窒素吸収量の (g ^m - ²) | | | | | |
| 5/23 | 4.3 | 89 | 3.86 | 0.04 | 0.17 | 2.0 | 32.6 | | | |
| 6/ 3 | 15.9 | 200 | 3.79 | 0.14 | 0.60 | 6.8 | 24.5 | | | |
| 6/13 | 60.3 | 372 | 3.65 | 0.27 | 2.20 | 13.5 | 12.4 | 0.22 | 10.5 | |
| 6/23 | 152.7 | 589 | 2.69 | 0.26 | 4.10 | 12.8 | 6.3 | 0.46 | 23.0 | |
| 7/ 3 | 305.9 | 578 | 1.50 | 0.28 | 4.58 | 14.0 | 6.2 | 0.47 | 23.6 | |
| 7/10 | 413.8 | 500 | 1.19 | 0.29 | 4.92 | 14.6 | 6.0 | 0.53 | 26.8 | 58.5 |

*:5月13日 2N^gm⁻²施肥



第 7 図 基肥と早期追肥窒素の利用率の経過

第 2 2 表 早期追肥の有無と水稻の生育

| 調査日 | 区 | 窒素吸収量(gm ⁻²) | 草丈(cm) | 茎数(本m ⁻²) |
|------|-------|--------------------------|--------|-----------------------|
| 5/29 | 早期追肥有 | 0.47 | 31.2 | 188 |
| | 早期追肥無 | 0.42 | 31.1 | 166 |
| 6/ 3 | 早期追肥有 | 0.72 | 33.5 | 262 |
| | 早期追肥無 | 0.61 | 32.9 | 211 |

(1991年)

(3) 考 察

水稲による早期追肥窒素の利用率については報告例が少ないが、茂木ら⁴⁵⁾によれば移植2週間後頃に施用する早期茎肥の利用率が15%程度で、移植後1か月目の窒素吸収量のうち20%は早期茎肥に由来しているとのことである。この値は本研究の結果とほぼ一致している。さらに、基肥窒素の利用率として30.5%という値を報告しているが、これは和田ら⁸⁰⁾の22~27%、勝見³⁰⁾の30%という結果とほぼ同程度であった。

施肥窒素の利用率の経過をみると、6月3日までは早期追肥の方が基肥より高くなっていた。水稲の窒素吸収量に占める早期追肥由来窒素量の割合も、移植後17日目で約33%、37日目でも約12%と大きな値を示した。その理由として移植後10日から2週間程度では、まだ水稲の根が十分に発達していないので、早い時期から基肥窒素の下層への移行が進行すれば、水稲は初期に基肥窒素を吸収しにくく、表層に多く存在する早期追肥窒素を吸収することになる。実際、ほ場における早期追肥施用と無施用の水稲の生育を比較した結果、初期の茎数が無施用区で少なくなっていた。このことから考えても、早期追肥の施用の必要性が確認された。

全層施肥した基肥窒素が早くから下層へ移行する中粗

粒質水田では、表層に施用される早期追肥が初期生育に重要な役割を果たしていた。しかし、その施用時期が遅れたり、施用量が多過ぎると、窒素が生育中期へ持ち越され、過繁茂や倒伏を招きかねない。そのため、目標吸収量と無機化土壌窒素量から適正な早期追肥量を算出する必要がある。

3. 早期追肥窒素の利用率の向上

ここでは、効率的な施肥法を目指して早期追肥窒素の利用率を向上するための方策に関して検討する。

(1) 試験研究方法

31.2 atom%重窒素硫酸を早期追肥として窒素成分で 2 g m^{-2} を慣行量施用する対照区と、31.2 atom%重窒素硫酸の早期追肥施用時に硝化抑制剤 2-アミノ-4-クロロ-6-メチルピリミジン (AM) を 200 mg m^{-2} 添加した硝化抑制区および、早期追肥に 3.21 atom%重窒素尿素を施用した尿素区の3区を設け、各区2連で試験した。

幼穂形成期 (7月10日) に稲体地上部を抜き取り、前述の II-2-2) の遮光処理試験と同様の方法で分析を行った。

(2) 結果

第23表に示す通り、硝化抑制区では脱窒・流亡率が対照区に比べて58.5%から37.5%に減少したのに対して、水稻への窒素利用率が14.6%から20.4%へ、土壌中への残存率が26.8%から42.2%へそれぞれ増加した。

第24表によれば早期追肥を尿素で施用すると、脱窒・流亡率が硫安施用の対照区に比較して58.5%から39.9%へ減少し、水稻への窒素利用率が14.6%から25.5%、土壌中への残存率も26.8%から34.6%へ、それぞれ増加した。一方、対照区の施肥の利用率は6月13日で頭打ちとなっているのに対し、尿素区の利用率は6月13日から7月10日までに約2倍に増加し、吸収期間がより長かった(第8図)。

(3) 考察

硝化抑制剤(AM)の添加により、早期追肥窒素の脱窒・流亡率が大きく低下した。BREMNER²⁶⁾は、硝化抑制剤(AM)は平均37%の硝化抑制率があり、アンモニア態窒素が亜硝酸・硝酸になってほ場から溶脱することを抑制すると報告している。陽⁴¹⁾も硝化抑制剤(AM)が硫安の流亡および脱窒を抑制する効果があることを認めている。

尿素を早期追肥として施用した尿素区は、対照とした硫安施用区に比べて脱窒量が少なく吸収期間が長くなり、

第23表 硝化抑制剤が早期追肥窒素の動態に及ぼす影響

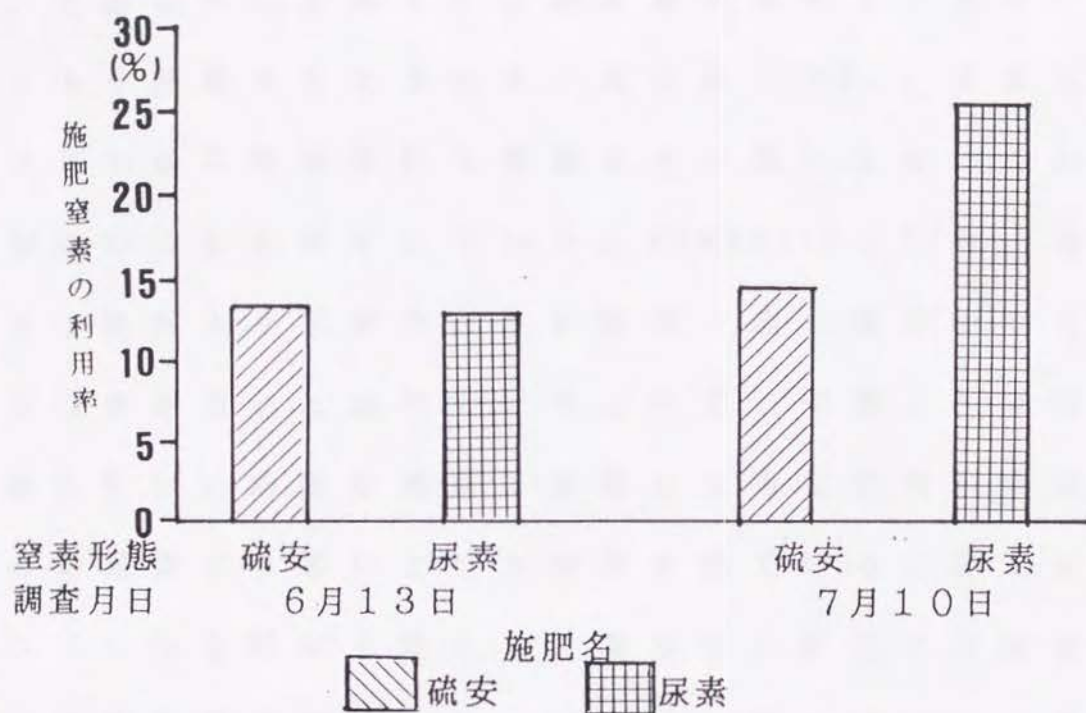
7月10日調査

| 処理方法 | 乾物重 (gm^{-2}) | 茎数 (本 m^{-2}) | 窒素濃度 (%) | 全窒素 吸収量 (gm^{-2}) | 施肥窒素 吸収量 (gm^{-2}) | 施肥窒素 利用率 (%) | 施肥中 N残存 土量 (gm^{-2}) | 施肥中 N残存 率 (%) | 脱窒・ 流亡率 (%) |
|---------|-----------------------------|----------------------------|-------------|------------------------------------|-------------------------------------|--------------------|--|------------------------|-------------------|
| 硝化抑制*1区 | 401.8 | 561 | 1.29 | 5.19 | 0.41 | 20.4 | 1.03 | 42.2 | 37.5 |
| 対 照 区 | 413.8 | 500 | 1.19 | 4.92 | 0.29 | 14.6 | 0.53 | 26.8 | 58.5 |

*1:2-アミノ-4-クロロ-6-メチルピリミジン(AM)による。

第24表 早期追肥の窒素形態の違いが施肥後の動態に及ぼす影響

| 調査時期 | 施肥窒素の形態 | 水 | | | 稲 | | 施肥の 利用率 (%) | 施肥の 土壌中 残存量 (g/m^2) | 施肥の 土壌中 残存率 (%) | 脱窒・ 流亡率 (%) |
|------|---------|----------------------------------|--------------------------|-------------|---|--|-------------------|--|--------------------------|-------------------|
| | | 乾物重 (g/m^2) | 茎数 (本/ m^2) | 窒素濃度 (%) | 全窒素 吸収量 (g/m^2) | 施肥窒素 吸収量 (g/m^2) | | | | |
| 6/13 | 尿素 | 42.2 | 294 | 3.60 | 1.51 | 0.26 | 13.1 | 0.61 | 30.3 | |
| | 硫安 | 60.3 | 372 | 3.65 | 2.20 | 0.27 | 13.5 | 0.22 | 10.5 | |
| 7/10 | 尿素 | 370.2 | 478 | 1.20 | 4.45 | 0.51 | 25.5 | 0.68 | 34.6 | 39.9 |
| | 硫安 | 413.8 | 500 | 1.19 | 4.92 | 0.29 | 14.6 | 0.53 | 26.8 | 58.5 |



第8図 早期追肥の窒素形態と利用率

窒素の利用率が高まった。しかし、最終的には窒素の利用率は高くなったものの、生育初期の窒素吸収量は尿素区と対照区では同程度であった。尿素は土壤中で一度炭酸アンモニアに変化すれば、弱アルカリ性を示すことから、土壌粒子によるイオン吸着量が硫安より大きく、肥効が永く持続するとされる。長谷川¹²⁾は、尿素では硫安より土壌に吸着される窒素成分が多いため、その溶脱が少ないことを報告している。FERRANTEら⁷⁾も、追肥試験では硫安より尿素的のほうが脱窒・流亡量が少なく、窒素回収率が高いと述べている。一方、安藤ら⁵⁾はポット試験を行い、幼穂形成期に施用した追肥の利用率は硫安の方が尿素より高いという結果を得ている。尿素的のアンモニアへの分解は土性により異なり、砂土で分解が遅く、粘土含量や肥沃度が高い土壌では分解が早いとも言われている⁷⁶⁾。また、石灰や有機物の施用でアンモニアへの変化が促進されるという報告⁵⁴⁾もあり、土壌条件によって利用率がかなり変動する場合がある。以上の点については今後さらに検討の余地はあるものの、硝化抑制剤の添加や尿素による早期追肥が施肥窒素の利用率を高める上で有効であると結論づけられる。

4. 摘要

礫質灰色低地土水田において、重窒素トレーサー法を使用して、早期追肥窒素の施用後の動態、早期追肥が水稻生育初期に果す役割、および早期追肥窒素の利用率を高める方策について、基肥窒素と比較して考察した。その結果は以下の通りに要約される。

(1) 中粗粒質土壌で全層施用した基肥窒素は、施用後16日頃には、深さ0～3cmの作土表層における濃度が大きく低下するが、早期追肥の施用によって表層の窒素濃度を高めることができた。

(2) 早期追肥窒素の水稻への利用率は、生育初期には基肥窒素より高い。しかし、6月中旬頃には吸収が頭打ちとなり、その頃から基肥窒素の利用率が高まっていた。移植後17日目までに水稻が吸収した窒素量に占める早期追肥由来の窒素の比率は約30%に達し、その施用の必要性が確認された。

(3) 早期追肥施用時に硝化抑制剤を添加すると、脱窒・流亡率が無添加区に比べて大きく減少し、水稻への利用率および土壌中への残存率がそれぞれ増加した。また、早期追肥に尿素を施用すると、硫安に比べて吸収期間が長くなり、利用率が高まり、脱窒・流亡率が低下した。このことから、硝化抑制剤の使用や尿素による施用が早期追肥の利用率を高めるための有効な手段

であることが判明した。

IV 復 帰 田 に お け る 施 肥 窒 素 お よ び 土 壌 窒 素 の 水 稲 に よ る 吸 収

第 II 章 で 施 肥 窒 素 の 利 用 率 の 変 動 要 因 に つ い て 検 討 し
た が、人 為 的 な 変 動 要 因 と し て 田 畑 輪 換 は 無 視 で き な い。
比 較 的 地 力 の 低 い 礫 質 灰 色 低 地 土 水 田 に お い て も、長 期
に わ た っ て 輪 換 を 繰 り 返 し た 後 の 復 帰 初 年 目 に コ シ ヒ カ
リ を 栽 培 す る と、基 肥 量 を 半 減 し て も 過 剰 生 育 気 味 と な
っ て 倒 伏 し、収 量 減 と な り や す い。そ こ で 本 章 で は、復
帰 田 水 稻 に よ る 基 肥 お よ び 追 肥 窒 素 の 利 用 率 な ら び に 土
壌 窒 素 の 無 機 化 量 と そ の 水 稻 に よ る 吸 収 量 の 関 係 な ど を
連 作 田 と 対 比 し な が ら 考 察 し た。

1. 復 帰 田 の 水 稻 の 生 育 と 施 肥 窒 素 の 利 用 率

復 帰 田 の 水 稻 の 生 育 お よ び 施 肥 窒 素 の 利 用 率 を 連 作 田
水 稻 と 比 較 し て、窒 素 吸 収 状 況 の 違 い を 把 握 す る。

(1) 供 試 ほ 場 お よ び 試 験 研 究 方 法

富 山 県 農 業 技 術 セ ン タ ー 内 で、水 稻 と 大 麦、大 豆 を 中
心 に 10 年 以 上 田 畑 輪 換 を 繰 り 返 し て い る 10 ～ 15 a の 水 田
に お い て、ま た 水 稻 を 連 作 し て い る 同 場 内 210B 号 田 を 対

照として、3年間にわたって同一の試験を実施した。試験対象はいずれも復帰初年の水田である。そのため復帰田の試験ほ場は毎年異なるが、いずれも100m以内の位置にあって、土壌統は礫質灰色低地土・国領統で、排水は良好である。これらほ場の来歴は第25表に示す通りである。また、土壌の理化学的性質の概要は第26表に示した。

試験ほ場には、各年とも標肥区と無窒素区を設けた。標肥区の基肥窒素量は復帰田では 2g m^{-2} 、連作田では 4g m^{-2} とした。移植1週間後に施用する早期追肥 2g m^{-2} 、出穂18日前と10日前の穂肥は各 2g m^{-2} 、出穂3～4日後の実肥は 2g m^{-2} と、連作田と復帰田で共通施用量とした。また、標肥区と無窒素区には P_2O_5 を 10g m^{-2} 、 K_2O を 8g m^{-2} それぞれ基肥として施用した。

標識窒素に関する試験方法は前々章Ⅱ-1で述べた通りである。ただし、復帰田の基肥窒素量は上記の通り 2g m^{-2} とした。1988年と、1989年には5月6日に、1990年は5月7日に水稻コシヒカリを移植した。標識窒素試験区の施肥や調査時期の詳細は第27表に示した。これらの時期に抜き取った稲体においてⅡ-2-1)と同様の方法で重窒素atom%を測定し、施肥由来の窒素吸収量と施肥窒素の利用率を求めた。

1988年には、下層土からの標識窒素の吸収量を山室の

第25表 供試土壌の来歴

| ほ場 | 1979 | 1980 | 1981 | 1982 | 1983 | 1984 |
|------|--------|--------|--------|------|------|------|
| 118号 | 水稲白菜 | 水稲白菜 | 水稲白菜 | 水稲 | 大麦大豆 | 大麦大豆 |
| 008号 | 大豆 | 大豆 | ハムキ | 大豆 | 水稲 | 大麦大豆 |
| 105号 | チューリップ | チューリップ | チューリップ | 小麦 | 小麦 | 水稲 |
| 210号 | 水稲 | 水稲 | 水稲 | 水稲 | 水稲 | 水稲 |
| | 1985 | 1986 | 1987 | 1988 | 1989 | 1990 |
| 118号 | 水稲 | 大麦大豆 | 大麦大豆 | 水稲 | | |
| 008号 | 水稲 | 大麦 | 水稲 | 大豆 | 水稲 | |
| 105号 | 水稲 | 水稲 | 大麦大豆 | 大麦大豆 | 大麦大豆 | 水稲 |
| 210号 | 水稲 | 水稲 | 水稲 | 水稲 | 水稲 | 水稲 |

□で囲ったところが試験ほ場

第26表 供試土壌の理化学性

| 試験 年度 | ほ場 | 土 性 | CEC (cmol (+)kg ⁻¹) | T-C (%) | T-N (%) | 作 土 深(cm) | 減 水 深(cmd ⁻¹) |
|---------------|-----|--------|---------------------------------------|------------|------------|-----------------|---------------------------------|
| 1990 | 復帰田 | 作土 | SL 7.61 | 1.83 | 0.18 | 16.5 | 1.1 |
| | | 下層土 | SL 7.39 | 1.42 | 0.14 | | |
| 1989 | 復帰田 | 作土 | SL 7.26 | 1.61 | 0.16 | 17.1 | 4.0 |
| | | 下層土 | SL 6.60 | 1.36 | 0.14 | | |
| 1988 | 復帰田 | 作土 | SL 8.12 | 1.78 | 0.18 | 18.0 | 2.1 |
| | | 下層土 | SL 6.60 | 1.30 | 0.13 | | |
| 1990~ 1988 | 連作田 | 作土 | SL 7.69 | 1.83 | 0.16 | 16.8 | 1.4~2.0 |
| | | 下層土 | SL 6.36 | 1.53 | 0.14 | | |

第27表 標識窒素の枠試験区の構成と施肥日および調査日

| 区名 | 施肥量 (N _g m ⁻²) | 施 肥 時 期 | | | 調 査 時 期 | | |
|------|--|---------|------------|------------|---------|--------------|------|
| | | 1988 | 1989 | 1990 | 1988 | 1989 | 1990 |
| 基肥 | 4(連作田) | 5/ 6 | 5/ 6 | 5/ 7 | 7/19 | 7/17 | 7/12 |
| | 2(復帰田) | 5/ 6 | 5/ 7 | 5/10 | 7/19 | 7/17 | 7/12 |
| 早期追肥 | 2 | 5/12 | 5/13 | 5/17, 14*1 | 7/19 | 7/17 | 7/12 |
| 穂肥Ⅰ | 2 | 7/23 | 7/25 | 7/17 | 8/12 | 8/ 2 | 8/ 3 |
| 穂肥Ⅱ | 2 | 8/ 4 | 8/ 2 | 7/25 | 8/12 | 8/11 | 8/ 3 |
| 実肥 | 2 | 8/12 | 8/18, 17*1 | 8/ 8 | 9/19 | 8/23, 9/18*1 | 9/ 6 |

*1: 連作田の施肥日および調査日
各区とも該当する施肥のみ重窒素硫酸を施用し、それ以外は非ラベル硫酸を施用した。

方法⁹⁰⁾に準じて測定した。すなわち、70atom%重窒素硫酸を窒素成分で1500ppmの水溶液とし、1㎡当り窒素成分0.5gを深さ20cmの位置に、30×30cmの枠内の10ヶ所に分散させて注射器を用いて注入し、施用1週間後に水稻地上部を抜き取り、Ⅱ-1と同様の方法で施肥窒素の利用率を経時的に5回測定した。

各栽培年の出穂期は1988年が8月12日、1989年が8月11日、1990年が8月3日で、成熟期は1988年が9月19日、1989年が9月20日、1990年が9月6日であった。

(2) 結果

水稻の生育と収量の関係は第28表に示した。復帰田標肥区ではやや過剰生育気味に経過し、稈長・穂数が連作田より増加したが、穂数はそれほど増えず、年度によっては倒伏程度も大きくなり、連作田より6.5%程度減収した。一方、無窒素区は生育・収量とも復帰田で連作田よりまさっていた。また、連作田は標肥区と無窒素区で生育・収量に大きな差があるのに対し、復帰田ではこの差がわずかであった。

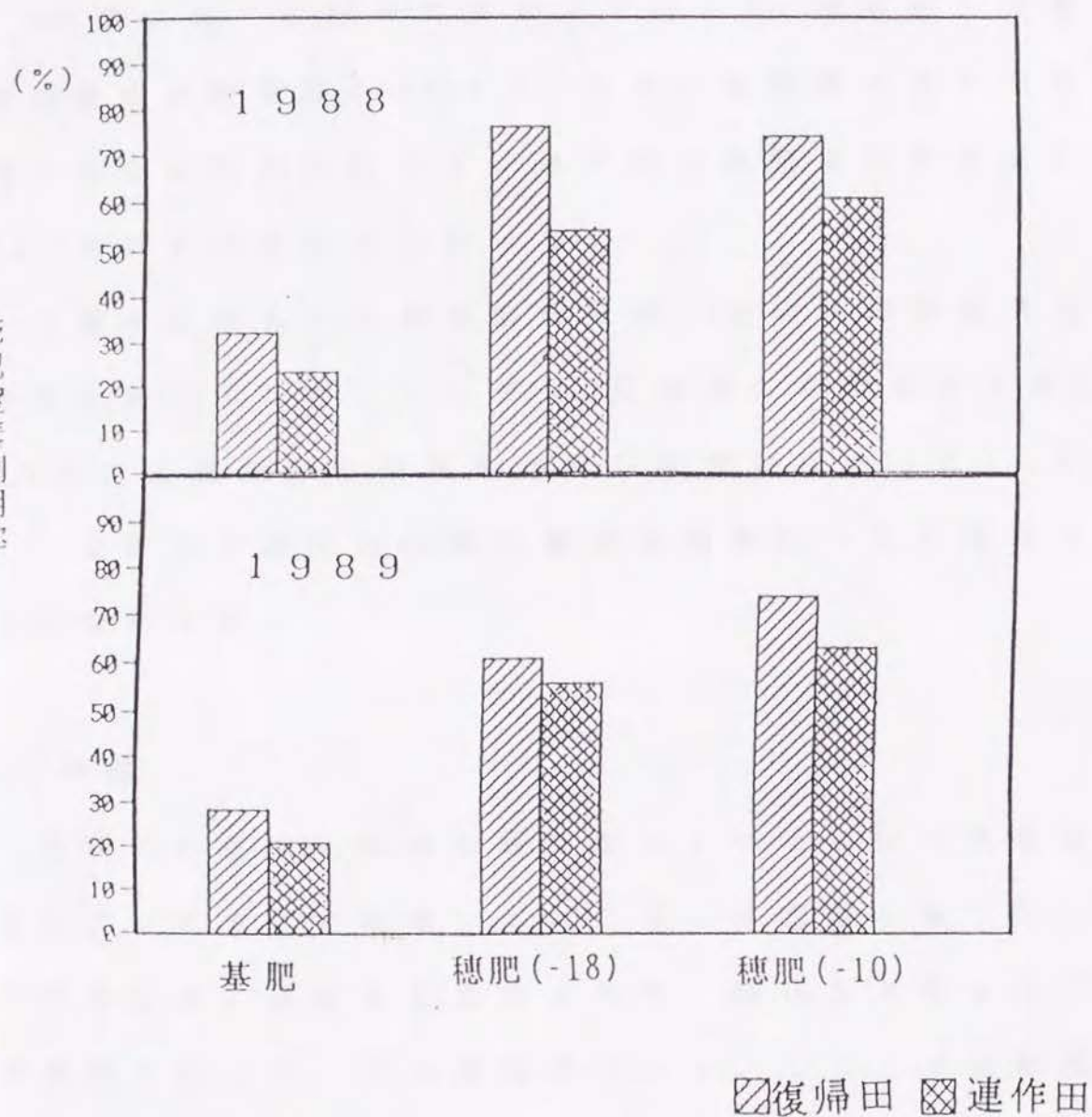
復帰田における水稻の施肥窒素の利用率は、基肥および穂肥とも、第9図に示したように連作田より約10%高かった。一方、早期追肥、実肥の利用率は年度によっては

第28表 穂数・粒数・最長稈長と収量および倒伏程度 (㎡当り)

| 試験 年度 | ほ場 | 区 | 穂数 (本) | 粒数 (×100粒) | 最長稈長 (cm) | 収量 (g) | 倒伏 ^{*2} 程度 |
|----------|----------------------------|-----|-----------|---------------|--------------|-----------|------------------------|
| 1990 | 復帰田 (105)* ¹ | 標肥 | 367 | 299.5 | 93.9 | 597 | 3 |
| | | 無窒素 | 392 | 333.2 | 90.7 | 588 | 1 |
| | 連作田 (210) | 標肥 | 421 | 322.0 | 88.9 | 553 | 2 |
| | | 無窒素 | 281 | 202.0 | 77.5 | 403 | 0 |
| 1989 | 復帰田 (008) | 標肥 | 390 | 286.9 | 89.2 | 409 | 2 |
| | | 無窒素 | 322 | 228.6 | 79.5 | 401 | 0 |
| | 連作田 (210) | 標肥 | 385 | 281.9 | 91.2 | 459 | 1 |
| | | 無窒素 | 234 | 169.4 | 78.2 | 371 | 0 |
| 1988 | 復帰田 (118) | 標肥 | 439 | 301.8 | 93.9 | 399 | 4 |
| | | 無窒素 | 404 | 256.5 | 86.7 | 394 | 2 |
| | 連作田 (210) | 標肥 | 374 | 306.3 | 88.4 | 491 | 0 |
| | | 無窒素 | 262 | 179.5 | 77.5 | 331 | 0 |

*1: () 内はほ場番号

*2: 倒伏程度 無(0)～甚(5)



第9図 施肥窒素利用率

連作田の方が復帰田より高い場合もあり、両者の間に一定の関係は認められなかったが、3年間の平均値では第29表に示すように復帰田の方が高かった。

3年間の利用率の平均値から算出した復帰田の施肥窒素の吸収合計量は 4.73 g m^{-2} であり、基肥量が連作田の半量であるにもかかわらず、連作田の施肥窒素吸収量 4.53 g m^{-2} をわずかながら上回った。

下層土に注入した重窒素硫酸の1週間後の吸収利用率を第30表に示した。ここでは7月以降に利用率が上昇し、8月には追肥窒素の利用率と同じ程度に高まった。しかし、復帰田と連作田の間の窒素利用率に一定の関係はみられなかった。

(3) 考察

長期にわたって輪換を繰り返している水田の復帰初年目にコシヒカリを栽培したところ、基肥量を減じたにもかかわらず、過剰生育気味となり、倒伏した株も多く、収量減となった。この原因について、ここでは施肥窒素の利用率について連作田と対比して考察する。

施肥窒素の利用率は、平均すると基肥、早期追肥、穂肥、実肥とも復帰田で連作田を上回っていた(第29表)。しかし、年度間の変動も大きく、早期追肥、実肥では統

第29表 水稻の施肥窒素利用率

(%)

| 年度 | 圃場 | 基肥 | 早期追肥 | 穂肥Ⅰ | 穂肥Ⅱ | 実肥 |
|--------|------|------|------|------|------|------|
| 1990 | 復帰田 | 36.0 | 1.6 | 74.7 | 70.1 | 50.8 |
| | 連作田 | 28.3 | 3.4 | 65.1 | 69.0 | 71.1 |
| 1989 | 復帰田 | 28.1 | 13.7 | 61.0 | 73.7 | 24.9 |
| | 連作田 | 20.6 | 3.9 | 55.7 | 63.0 | 55.1 |
| 1988 | 復帰田 | - | 5.2 | 76.4 | 74.1 | 88.0 |
| | 連作田 | 23.3 | 3.0 | 53.9 | 60.8 | 30.8 |
| 3年間の平均 | 復帰田 | 32.1 | 6.8 | 70.6 | 72.6 | 54.6 |
| | 偏差*1 | 5.6 | 6.2 | 8.4 | 2.2 | 31.7 |
| | 連作田 | 24.1 | 3.5 | 58.2 | 64.3 | 52.5 |
| | 偏差 | 3.9 | 0.5 | 6.0 | 4.2 | 20.5 |

*1:年度間の偏差

第30表 下層土に注入した重窒素の利用率

| 注入時期 | 調査時期 | 重窒素利用率(%) | |
|-------|-------|-----------|------|
| | | 復帰田 | 連作田 |
| 6月 6日 | 6月13日 | 2.4 | 1.2 |
| 6月22日 | 6月28日 | 7.4 | 9.5 |
| 7月 6日 | 7月13日 | 37.1 | 27.3 |
| 8月 5日 | 8月11日 | 43.0 | 60.8 |
| 9月12日 | 9月19日 | 51.1 | 45.8 |

1988年調査

計的に有意な差は認められなかった。肥料の利用率の設定は施肥設計の基礎であり、復帰田における利用率を連作田と同じに見積もることは、生育過剰の要因になると考えられる。

西天・山室⁵²⁾によると、施肥窒素の利用率は連作田の方が復帰田よりも高いとされる。しかし、この結果は低湿重粘土において得られたものであり、排水条件の良い本研究の場合とは条件が異なっている。一方、市田・遊坐¹⁸⁾は、壤土での基肥窒素の利用率は復帰田初年目では連作田より高いという本研究と一致した結果を報告している。加えて、土層内では復帰田が連作田に比べて、より一層酸化的状态であったことを述べている。これらの結果から、本研究のような排水条件の良い礫質灰色低地土の復帰田では、施肥窒素の利用率が高まるものと推定された。

下層土に注入した重窒素の利用率では、復帰田と連作田の間で差が認められなかった。金田ら²⁸⁾は、下層土に注入したルビジウムの水稻への吸収量が復帰田で多いことを報告している。しかし、これは干拓地の例であり、本研究のような礫質の下層土とは条件が異なっている。

2. 復帰田の無機化土壌窒素量

復帰田の水稲生育はやや過剰気味に経過していた。その原因の一つとして、すでに施肥窒素の利用率が高まっていることを指摘したが、従来から報告されているように、復帰田では無機化土壌窒素量が大きくなることが過剰生育をもたらしている可能性があり、以下この点に関して論議する。

(1) 試験研究方法

1988年から1990年の3年間試験を続行し、IV-1で述べたのと同じのほ場から供試土壌を採取した。作土は全層を、下層土は作土下10cmをそれぞれ基肥施用前に採取した。いずれも5mmの篩を通した後、湿潤状態のまま40gを秤取し、直径3cm、深さ13cmの有底ガラス管に充填し、水20mlを加えて代かき状態に攪拌した後、湛水状態とし、密栓し、ほ場内に埋設し、2連で培養した。すなわち、移植時に作土、下層土ともゴム栓上部が表層にくるようにガラス管を立てて、水稲栽培下の富山県農業技術センター水田作土中に埋設放置し（密栓ほ場インキュベーション）、6月13日、7月3日、7月23日、出穂期および成熟期に抜き取って、常法によりアンモニア態窒素を測定し、原土壌中のアンモニア態窒素量を差し引いた値を無機化土壌窒素量とした。

(2) 結果

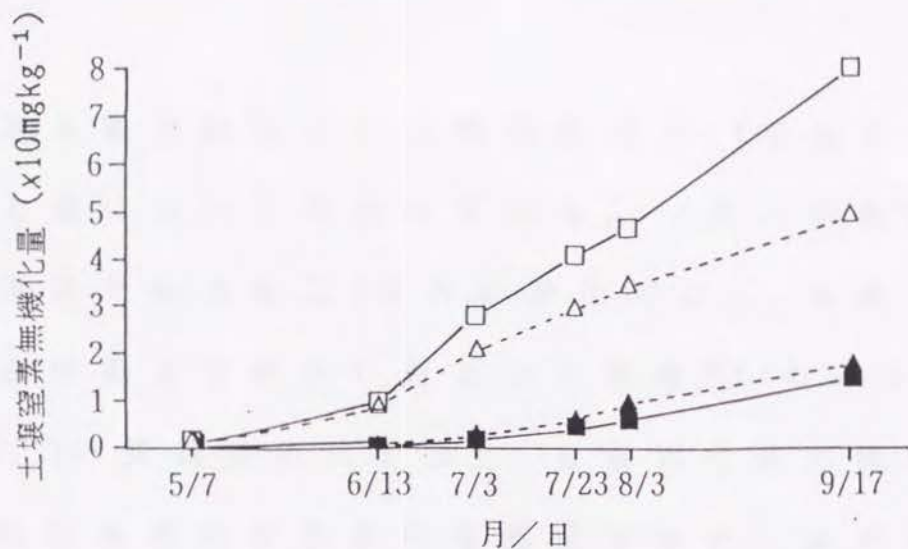
作土および下層土の乾土当りの無機化窒素量を第10～12図に示した。成熟期における作土からの無機化窒素量は、復帰田が $50 \sim 80 \text{ mg kg}^{-1}$ 、連作田が $30 \sim 50 \text{ mg kg}^{-1}$ で、復帰田の方が多かった。しかし、生育初期の無機化土壌窒素量は、復帰田と連作田の間に大差はなく、連作田の方が多い場合もあった。その後、次第に復帰田が連作田を上回り、出穂期には 10 mg kg^{-1} 程度、成熟期には $10 \sim 30 \text{ mg kg}^{-1}$ 程度、復帰田の方が高くなるという経過をたどった。無機化土壌窒素量の連作田との差は、復帰田土壌の全炭素および全窒素含量が高い1990年使用のほ場では大きく、それらが低い1989年使用のほ場では小さかった。

下層土の無機化窒素量を成熟期で比較すると、復帰田が $13 \sim 15 \text{ mg kg}^{-1}$ 、連作田では $18 \sim 20 \text{ mg kg}^{-1}$ 程度で、復帰田と連作田の間に大差はなかった。

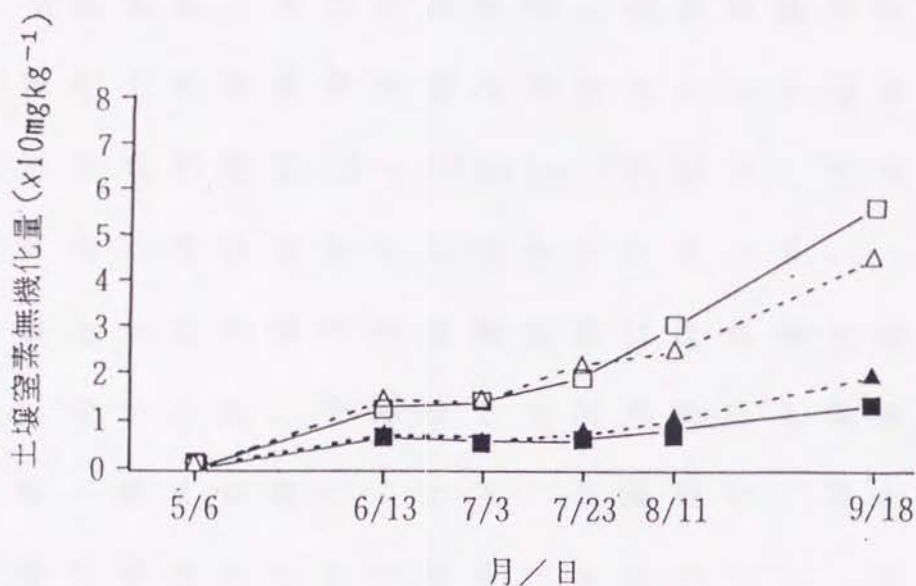
なお、原土中の無機態窒素量は 1 mg kg^{-1} 以下で、ほ場間差は認められなかった。

(3) 考察

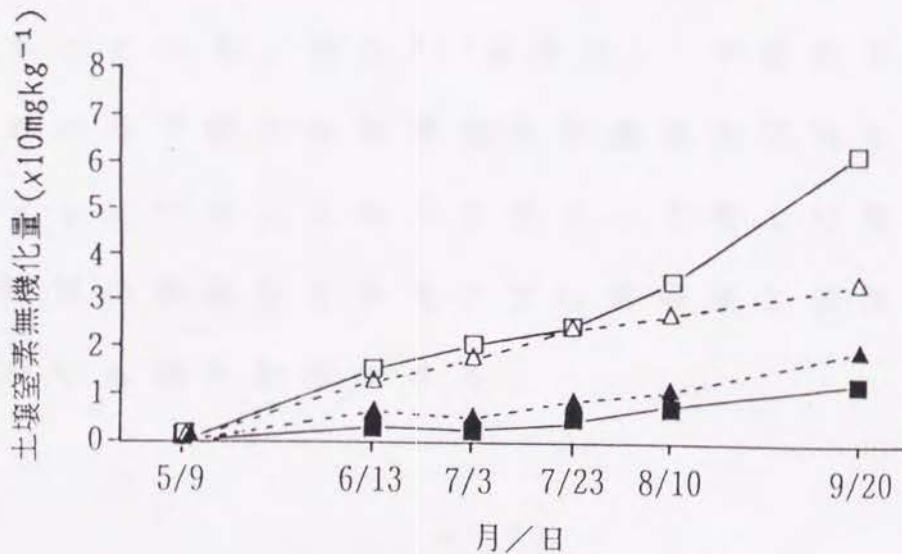
土壌窒素の無機化量は、復帰田の方が連作田よりも高くなるという報告が多い(27, 52, 59)。しかしその内容を検討すると、復帰田で無機化土壌窒素量が大幅に高まっ



第10図 無機化土壌窒素の経過 (1990年)



第11図 無機化土壌窒素の経過 (1989年)



第12図 無機化土壌窒素の経過 (1988年)

たとみる報告は主として畑期間が3～4年以下の強粘質グライ土壤において得られている。一方、中粗粒の強グライ土壤における大豆3年作の跡地では、無機化土壤窒素量が連作田より減少したという報告⁵¹⁾もある。また、壤土(L)の長期輪換田では、有機物や改良資材を施用しなければ水稻の安定多収を確保できず、必ずしも復帰田の無機化土壤窒素量は高くないとの報告¹⁸⁾もある。本研究の結果は、礫質灰色低地土の長期輪換田では復帰田の無機化土壤窒素量が連作田のそれよりは多くなったが、その差は成熟期で $10 \sim 30 \text{ mg kg}^{-1}$ 程度で、年度により大きな差がない場合もあることを示している。

下層土からの窒素の無機化量は復帰田と連作田の間に大差はなかった。干拓地では畑期間に土壤構造が発達して乾燥・酸化が進むことで、復帰田の下層土からの窒素供給量が増加するとの報告があるが²⁸⁾、それは重粘土の場合であり、本研究のように礫質で土壤の全炭素量・全窒素量が干拓地の半分程度と低いほ場の条件とは大きく異なっている。大竹⁵¹⁾もまた、中粗粒質土壤の輪換田における下層土の無機化窒素量は連作田と差がないことを示している。このことから、下層土の無機化窒素量は中粒質の礫質灰色低地土では復帰田と連作田の間に大差がないものと判断できる。

長期にわたって田畑輪換を繰り返した礫質灰色低地土の復帰田における無機化土壌窒素量は、生育初期には連作田と同程度であるが、成熟期にはそれより多くなった。しかし、年度によっては連作田との差が小さい場合もみられた。このことは、水田転作の長期化が地力や施肥管理に及ぼす影響を評価する上で重要なことであると考えられる。

復帰田の作土における窒素無機化パターンにも、従来の知見とは多少異なる状況が見られた。乾土効果によって復帰田の無機化土壌窒素量が増加すると考えるならば、インキュベーション初期の無機化土壌窒素量が多くなるはずである。しかし、そのような傾向は認められず、移植から7月23日頃までは連作田と同程度の無機化量であった(第10～12図)。西天・山室⁵²⁾の報告においても、復帰田の無機化土壌窒素量が、インキュベーション初期では連作田より少ないことを示している。

従来から、復帰田における無機化土壌窒素量の増加は、乾土効果に依存するという考えが多いが、本研究における復帰田での土壌窒素の無機化量の増加は乾土効果とは異なる要因に支配されているものと推定される。無機化量増加の別の要因として、土壌中の有機物の質と集積条件の違い^{3, 57)}、土壌の団粒構造の違い⁵⁰⁾などが考えら

れるが、これらは今後の検討課題として残される。

3. 無機化土壤窒素の水稻による利用率

礫質灰色低地土の復帰田における、土壤窒素の無機化についての傾向は把握できたが、水稻による土壤由来窒素の吸収については説明が不十分である。ここでは、この点に関して連作田の場合と比較しながら検討する。

(1) 試験研究方法

IV-2で求めた無機化土壤窒素量の値から、1.0と仮定した作土の仮比重と作土深を乗じて面積当りの無機化土壤窒素量を求めた。下層土では隙が多くて調査が困難な上に、下限を定めにくいので、層深10cm、仮比重1.0と仮定して、面積当りの無機化土壤窒素量を計算し、作土と下層土の無機化量の合計を単位面積当りの無機化土壤窒素量とした。

水稻の窒素吸収量はIV-1で得られた結果から、標肥区では水稻の全窒素吸収量から施肥由来の窒素吸収量を差し引いた値を土壤由来の窒素吸収量とし、無機化土壤窒素量に対する土壤由来窒素吸収量の比率を土壤窒素の利用率として、復帰田と連作田で比較した。無窒素区に

については、水稻の窒素吸収量の無機化土壌窒素量に対する比率を土壌窒素の利用率として考察した。

(2) 結果

無窒素区における単位面積当りの無機化土壌窒素量は、1990年では復帰田の方が連作田より高く経過した。この値は他年度の復帰田の値に比べて大きかった。また、1988年と1989年の無機化土壌窒素量は、出穂期までは復帰田と連作田との間での差は小さく、成熟期になって始めて復帰田の方が高くなった。水稻の窒素吸収量はいずれの年度においても生育初期から連作田に比べて復帰田で高く経過した。1988年と1989年は、7月23日までの無機化土壌窒素量は連作田の方が多かったが、水稻の窒素吸収量は逆に復帰田で多く無機化土壌窒素の利用率が、復帰田で連作田より高くなっていた(第31表)。

無機化土壌窒素量と水稻の窒素吸収量の経過を3年間の平均値で第13図に示した。復帰田はほ場が変るため年度による変動があり、平均値の標準偏差が大きい。しかし、標準偏差を考慮に入れても吸収量は無機化量と同程度かやや多くなる。一方連作田では、無機化土壌窒素量が少ないうえ、吸収量は無機化量より少ない。

標肥区における水稻の全窒素吸収量と、施肥および土

第31表 無窒素区水稻の窒素吸収量と無機化土壌窒素量

| | | (gm ⁻²) | | | | | |
|------|------------|---------------------|------|------|------|-------|-------|
| 年度 | 調査項目 | ほ場 | 6/13 | 7/3 | 7/23 | 出穂期*3 | 成熟期*4 |
| 1990 | 無機化土壌窒素量 | 復帰田 | 1.57 | 4.83 | 7.12 | 8.25 | 14.67 |
| | | 連作田 | 1.48 | 3.77 | 5.60 | 6.76 | 10.09 |
| | 水稻の窒素吸収量 | 復帰田 | 1.54 | 4.99 | 7.95 | 8.42 | 12.80 |
| | | 連作田 | 0.94 | 2.27 | 3.73 | 3.91 | 5.71 |
| 1989 | 無機化土壌窒素量 | 復帰田 | 2.84 | 3.03 | 3.94 | 6.10 | 10.96 |
| | | 連作田 | 3.31 | 3.12 | 4.69 | 5.51 | 10.10 |
| | 水稻の窒素吸収量 | 復帰田 | 0.96 | 2.10 | 3.88 | 4.53 | 7.92 |
| | | 連作田 | 0.46 | 1.45 | 3.33 | 3.20 | 4.96 |
| 1988 | 無機化土壌窒素量*1 | 復帰田 | 2.60 | 3.36 | 4.12 | 5.93 | 10.59 |
| | | 連作田 | 2.62 | 3.27 | 4.70 | 5.35 | 7.41 |
| | 水稻の窒素吸収量*2 | 復帰田 | 0.84 | 4.26 | 7.78 | 9.64 | 9.56 |
| | | 連作田 | 0.44 | 2.06 | 3.66 | 5.07 | 6.07 |

*1:ほ場埋設密栓インキュベーションによる作土層+下層の単位面積当り無機化土壌窒素量

*2:無窒素区水稻の窒素吸収量

*3・*4:出穂期・成熟期調査は第27表参照

第32表 標肥区水稻の全窒素吸収量と施肥由来および土壌由来窒素吸収量

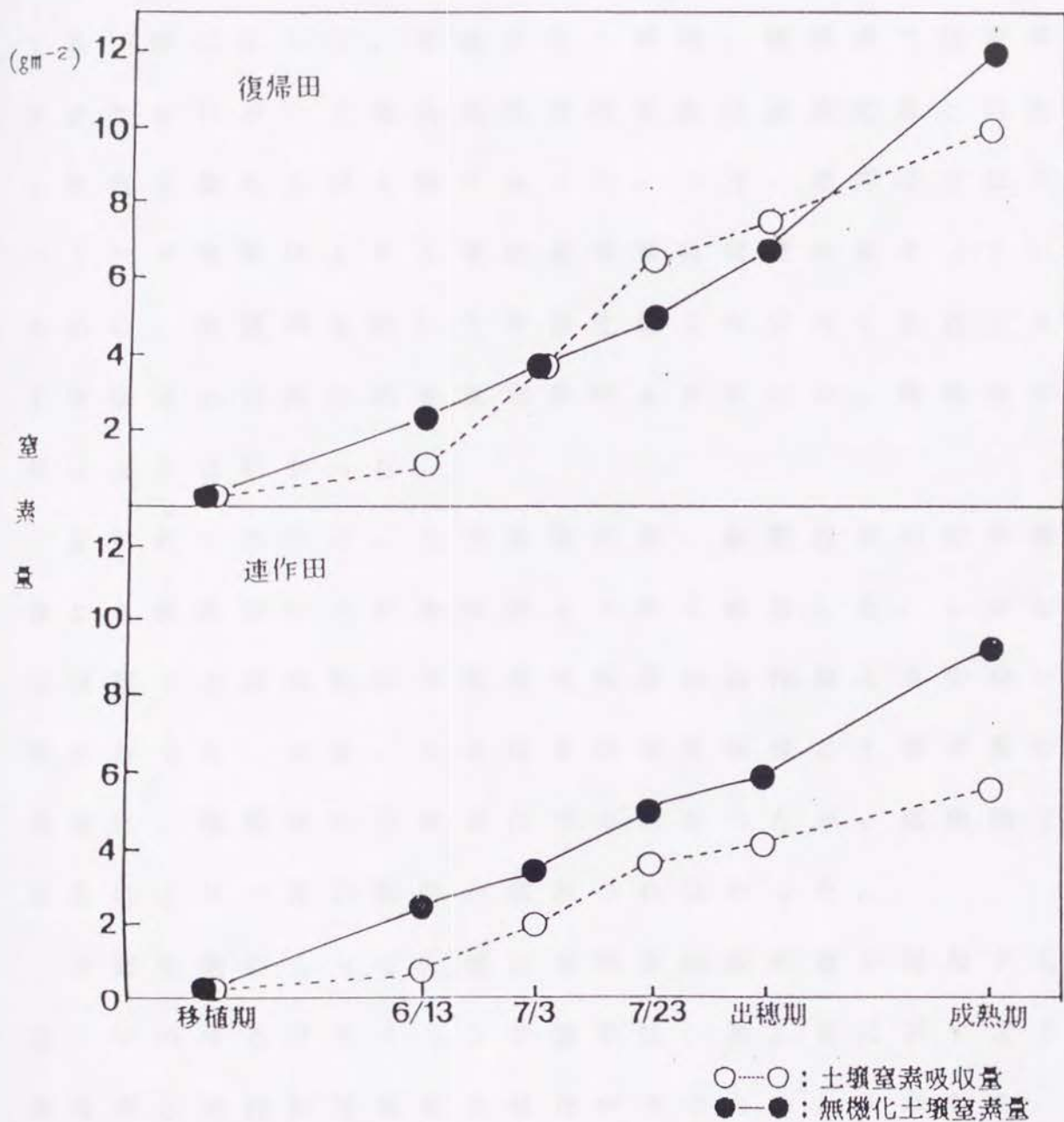
| | | (gm ⁻²) | | | | | |
|------|-----------|---------------------|--------|------|-------|-------|--------|
| 年度 | 調査項目 | ほ場 | 6/13*1 | 7/3 | 7/23 | 出穂期*2 | 成熟期*3 |
| 1990 | 全窒素吸収量 | 復帰田 | 2.26 | 4.69 | 10.62 | 13.00 | 18.04 |
| | | 連作田 | 2.51 | 3.92 | 8.18 | 8.83 | 12.74 |
| | 施肥由来窒素吸収量 | 復帰田 | 0.46 | 0.75 | 2.24 | 3.64 | 4.66 |
| | | 連作田 | 0.75 | 1.20 | 2.51 | 4.00 | 5.42 |
| | 土壌由来窒素吸収量 | 復帰田 | 1.80 | 3.94 | 8.38 | 9.36 | 13.38 |
| | | 連作田 | 1.76 | 2.72 | 4.43 | 5.35 | 7.43 |
| 1989 | 全窒素吸収量 | 復帰田 | 1.76 | 3.90 | 5.49 | 9.94 | 10.98 |
| | | 連作田 | 1.57 | 4.20 | 5.10 | 9.00 | 12.33 |
| | 施肥由来窒素吸収量 | 復帰田 | 0.61 | 0.84 | 0.83 | 3.52 | 4.02 |
| | | 連作田 | 0.56 | 0.91 | 0.91 | 3.62 | 4.84 |
| | 土壌由来窒素吸収量 | 復帰田 | 1.15 | 3.06 | 4.66 | 6.42 | 6.96 |
| | | 連作田 | 1.01 | 3.29 | 4.19 | 5.37 | 7.49 |
| 1988 | 全窒素吸収量 | 復帰田 | 1.22 | 5.69 | 7.74 | 15.70 | 11.79 |
| | | 連作田 | 0.92 | 3.89 | 4.58 | 12.19 | 12.00 |
| | 施肥由来窒素吸収量 | 復帰田 | 0.95 | 1.51 | 1.51 | 4.52 | 4.52*4 |
| | | 連作田 | 0.66 | 0.99 | 0.99 | 3.29 | 3.91 |
| | 土壌由来窒素*5 | 復帰田 | 0.27 | 4.18 | 6.23 | 11.18 | 7.27 |
| | | 連作田 | 0.26 | 2.90 | 3.59 | 8.90 | 8.09 |

*1:6月13日に施肥の吸収量を測定したのは1989年のみである。89年に調査した吸収経過の結果に基づき7月23日における利用率に対して基肥は60%、早期追肥は100%が吸収されているものとして1988・1990年を算出した。

*2,*3:出穂期、成熟期は第27表参照

*4:出穂期の窒素吸収量が15.7g/m²と過剰であるため実肥の施用をひかえた。

*5:全窒素吸収量から施肥由来窒素吸収量を差引いた。

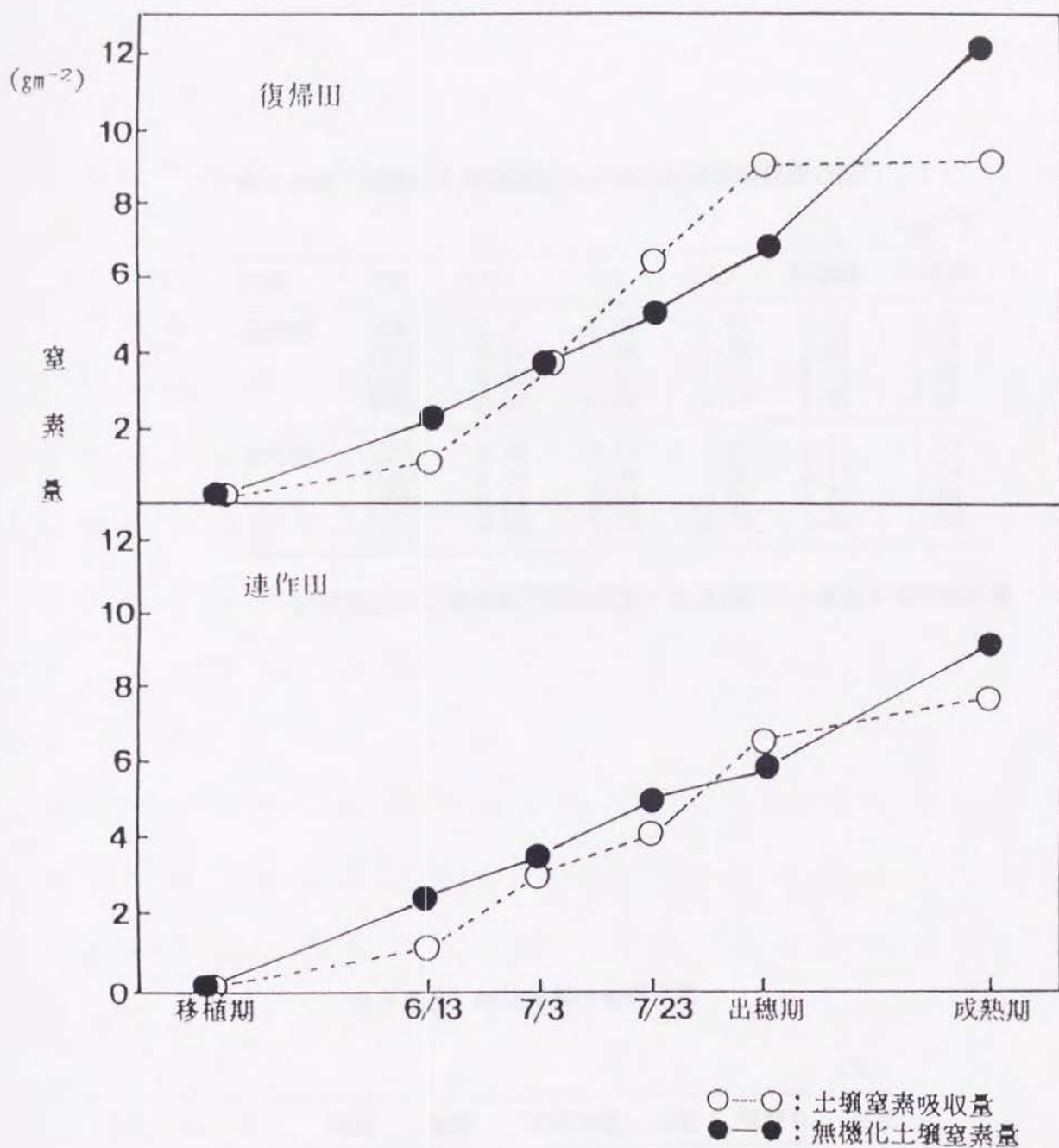


第 13 図 無窒素区の無機化土壌窒素量と
水稲の窒素吸収経過 (1988～1990年)

壤由来の窒素吸収量を第32表に、また、無機化土壌窒素量と水稲の土壌由来窒素吸収量の経過を3年間の平均値で第14図に示した。無窒素区と同様、復帰田では標準偏差が大きいが、土壌由来窒素吸収量は無機化量と同程度か無機化量を上回る値であった。一方、連作田ではブライミング効果により土壌由来窒素吸収量が高まっているものの、出穂期を除いて無機化量より少なく経過した。土壌窒素の利用率は無窒素栽培より高いが、復帰田の標肥区よりは低かった。

全般的にみると、全窒素吸収量、施肥由来の窒素吸収量とも復帰田の方が連作田より多く経過した。しかし、成熟期では復帰田の全窒素吸収量が連作田より少ない年度があった。また、土壌由来窒素吸収量と土壌窒素の利用率は、復帰田の方が連作田で高かったが、成熟期では年度により一定の傾向が認められなかった。

窒素施肥によって土壌由来窒素の吸収量が増加する現象、いわゆるブライミング効果は、第33表に示すように復帰田と連作田で異なる状況がみられた。すなわち、復帰田の標肥区における土壌由来窒素吸収量は無窒素区と同程度で、ブライミング効果が認められなかったのに対し、連作田標肥区での土壌由来窒素吸収量は7月3日に平均 1 g m^{-2} 、出穂期に同 2.5 g m^{-2} 程度無窒素区に比べて大



第 1 4 図 標肥区の無機化土壌窒素量と水稻の土壌由来窒素吸収量 (1988~1990年)

第33表 標肥区と無窒素区の土壤由来窒素吸収量の差*

| | | (gm ⁻²) | | | | |
|-----|------|---------------------|-------|-------|------|-------|
| ほ場 | 年度 | 6/13 | 7/3 | 7/23 | 出穂期 | 成熟期 |
| 復帰田 | 1990 | 0.26 | -1.05 | 0.43 | 0.94 | 0.58 |
| | 1989 | 0.19 | 0.96 | 0.78 | 1.89 | -0.96 |
| | 1988 | -0.57 | -0.08 | -1.55 | 1.54 | -2.29 |
| | 平均 | -0.04 | -0.05 | -0.11 | 1.46 | -0.89 |
| 連作田 | 1990 | 0.82 | 0.45 | 0.70 | 1.44 | 1.72 |
| | 1989 | 0.55 | 1.84 | 0.86 | 2.17 | 2.53 |
| | 1988 | -0.18 | 0.84 | -0.07 | 3.83 | 2.02 |
| | 平均 | 0.40 | 1.04 | 0.50 | 2.48 | 2.09 |

*: 標肥区の土壤由来窒素吸収量－無窒素区の土壤由来窒素吸収量

第34表 施肥窒素の有機化率

| | | (%) | | | |
|-----|------|------|------|------|-----|
| ほ場 | 基肥 | 早期追肥 | 穂肥Ⅰ | 穂肥Ⅱ | 実肥 |
| 復帰田 | 16.2 | 3.5 | 15.7 | 20.1 | 7.8 |
| 連作田 | 27.3 | 1.8 | 18.3 | 15.1 | 8.3 |

1990年調査

きい値を示した。

(3) 考察

水稻の無機化土壤窒素の利用率は、復帰田が連作田を上回っていた（第13～14図）。このような傾向が土壤型に関係なく認められることは、渡邊⁸³⁾の報告でも指摘されている。復帰田では土層内が酸化的状态になり、根の活力が高まるため^{18, 27)}、施肥窒素の利用率と同様、土壤窒素の利用率も高まると考えられる。土壤由来窒素吸収量は、水稻の全窒素吸収量の半分以上を占めることから、この知見は復帰田の施肥設計を行う上で重要である。

礫質灰色低地土長期田畑輪換田では、復帰初年度でも、無機化土壤窒素量が連作田と大差のない年度もあり、下層土の窒素発現量の増加量も小さいが、施肥窒素の利用率が高まり、その上無機化した土壤窒素の利用率も上昇した。そのため、基肥量を慣行の1/2に減量してもコシヒカリの生育量が過剰になったものとみられる。これらの結果を施肥設計の参考にすることで、復帰田でのコシヒカリの合理的な施肥法を組み立てることが可能となる。

本研究の解析過程で、窒素施肥によって土壤由来窒素の水稻による吸収量が増加する、いわゆるブライミング

効果が、復帰田ではほとんど認められないという結果が得られた（第33表、第13～14図）。このような報告例はこれまで見当たらないが、土壌窒素の行動を考える上で重要であると思われるので次章で検討と考察を行う。

4. 施肥窒素の有機化率

復帰田においては、土壌窒素の利用率が連作田に比べて高かった。その上、復帰田ではブライミング効果が認められないという興味ある結果を得た。そこで、施肥窒素の有機化率について検討し、その原因を解明する。

(1) 試験研究方法

試料はⅣ-1の1990年の試験から得たものを供試した。従って、調査時期も第27表に示す通りである。水稻を抜き取った後の枠内の土壌をⅡ-1と同様の方法で採取し、分析に供した。調査時における無機態窒素の現存量は無視できるほどわずかであるとともに、供試土壌では無機的固定を生じないので、測定値すべて有機態窒素であるとみなした。

(2) 結果

早期追肥窒素の有機化率が最も低く、実肥がこれに次いで、穂肥と基肥窒素はやや高い有機化率を示した（第34表）。復帰田における基肥の有機化率は16%で、連作田での値である27%よりかなり低かった。一方、早期追肥から実肥までの施肥では、復帰田と連作田の有機化率の間に一定の傾向は認められなかった。

（3）考察

ブライミング効果は、無機化した土壌窒素が施肥窒素で希釈され、再有機化が施肥窒素によって代替されるために発生するとみられている^{38, 95)}。本研究の結果をこの考え方に当はめると、復帰田では施肥窒素の有機化率が連作田より低く、このことがブライミング効果を抑える要因になると推定される。事実、基肥窒素の有機化率については、復帰田で連作田より低かった（第34表）。しかし、追肥窒素については有意な差が認められなかった。復帰田でブライミング効果が連作田より小さいという傾向は、西天・山室の結果⁵²⁾からも読み取れる。施肥窒素の有機化やブライミング効果は、有機物の多いほ場や前作物の残根量が多いほ場で高くなるという結果も報告されている⁴⁸⁾。連作田では多量の稲わらをほ場に全量鋤き込むが、輪換田の転作作物である大麦や大豆は水稻

に比べて地上部の残渣が少なく、残根量も少ない⁸⁵⁾。

そして、このことが施肥窒素の有機化率を低下させた要因の一つになっていると考えられた。

土壌窒素の供給量は、無窒素区の窒素吸収量から求めることが多いが、ブライミング効果が生ずる場合には、無窒素区の結果を施肥条件下の作物に当てはめることが不可能となる。本研究の結果では、無機化土壌窒素の利用率は復帰田で連作田より高かった。また、連作田においてブライミング効果が全期間の平均で20%程度あるのに対し、復帰田では2%程度とかなり低かった。このような違いがあることから、差引法で得られる数値は実際の利用率と合致しない場合もあることが十分に考えられる。合理的施肥法を確立するためには、土壌由来の窒素吸収量を把握しなければならず、ブライミング効果の土壌による変動を今後検討することが必要である。

5. 摘要

長期にわたって田畑輪換を繰り返した礫質灰色低地土の復帰田において、施肥窒素および土壌由来窒素の吸収を連作田と比較して以下のことを明らかにした。

- (1) 復帰田における土壌窒素の無機化量を連作田と比較した場合、作土では生育初期に両者の間には差はなか

ったが、成熟期には復帰田の方が $10 \sim 30 \text{ mg kg}^{-1}$ 多くなった。下層土では両者間に差が認められなかった。

(2) 施肥窒素の吸収利用率は、平均すると基肥と穂肥では復帰田の方が高かった。早期追肥と実肥についても年度間の変動が大きく、統計的に有意な差は認められなかった。復帰田と連作田の下層土に注入した重窒素の利用率にも有意な差が認められなかった。

(3) 無機化土壌窒素の利用率は、無窒素区と標肥区ともに復帰田の方が連作田よりも高い傾向にあった。このため、復帰田の無機化土壌窒素量が連作田と比べてそれほど多くない場合でも、水稻による土壌由来窒素吸収量は復帰田の方が連作田よりもかなり多くなった。

(4) 連作田では、標肥区水稻による土壌由来窒素吸収量は無窒素区の土壌由来窒素吸収量を上回るプライミング効果が認められた。一方、復帰田では無窒素区と標肥区の土壌由来窒素吸収量がほぼ同じで、同様の効果は認められなかった。

V. 富山県における無機化土壌窒素の実態とその水稻による吸収

以上述べてきたように、施肥窒素の利用率の変動要因、土壌窒素の利用率が復帰田と連作田で異なることなどを明らかにした。また、水稻が吸収する窒素成分の50%以上は、土壌から無機化した窒素に依存しているといわれている。従って、合理的な施肥管理を実現するには、土壌窒素の無機化量とその利用率を把握することが必要である。そこで本章では、富山県における土壌窒素の無機化特性とその年度による変動および無機化土壌窒素の水稻による吸収の実態について考察する。

1. 無機化土壌窒素量とその変動

土壌の理化学的性質が、土壌窒素の無機化に大きく影響していることが指摘されている(10, 27, 91, 94)。しかし、施肥設計を考えるには、量だけではなく、いつごろどの程度、発現するかという認識が重要である。富山県においては無機化パターンを調査した例がなく、過去の試みの多くは、温度あるいは、温度と乾土効果のみによって各土壌の窒素無機化パターンを決定し、その他の特性値

が年度によって変動しないとの前提に立っている。しかし、推定に使用する土壌窒素の無機化パターンが本当に年度間で変動しないかどうかは十分検討されていない。

ここでは、富山県下の水田を対象として土壌の理化学性と無機化量の関係を検討し、さらに数年間にわたる測定に基づいて無機化土壌窒素量および無機化パターンの年度間の変動について検討する。

(1) 試験研究方法

土壌試料は、1985年から1989年にかけて、第35表および第15図に示す各生育観測ほ場内において、基肥施用前の作土を数地点から採取し、それぞれ均一に混合して調整した。調査ほ場は県内の農業改良普及所が水稻の生育経過を観測するために設けたほ場で、毎年ほぼ一定の栽培管理を実施している。場所は県下の水田地帯にほぼ均一に散在しており、土壌は灰色低地土9地点、グライ土4地点、黄色土3地点、黒ボク土3地点である。各土壌試料は篩分けし、粒径5mm以下の部分を生土でそれぞれ実験に供試した。

粒径組成はピベット法により測定した。全炭素、全窒素はYanaco MT500W型C Nコーダーを使用して定量した。

陽イオン交換容量はSCHOLLENBERGER法³⁷⁾により、ま

第35 生育観測ほ場の所在地

| 土壌グループ | ほ場地点名 | 所 在 地 |
|--------|--|--|
| 灰色低地土 | 入善 黒部 立山 富山南部 婦中 高岡 砺波 小矢部 農技セ | 下新川郡入善町入善250、1988年から同 上野2454 黒部市中村5517 中新川郡立山町本郷島7 富山市布市254 婦負郡婦中町下吉川627、1988年から同 226 高岡市三ヶ98 砺波市西中448、1988年から同 382 小矢部市福上198、1986年から同 茄子島173、 1988年から同 矢水町531 富山市吉岡1124-1(210B号ほ場) |
| グライ土 | 富山北部 小杉 福岡 水見 | 富山市浜黒崎648 射水郡小杉町白石417 西砺波郡福岡町下向田210 氷見市加納406、1988年から同 1423 |
| 黄色土 | 大沢野 八尾 井波 | 上新川郡大沢野町万願寺704 婦負郡八尾町窪15 東砺波郡井波町高瀬433、1986年から同 704 |
| 黒ボク土 | 魚津 上市 福光 | 魚津市大海寺野382、1987年から同 天神新5165 1988年から同 719 中新川郡上市町広野551 西砺波郡福光町竹内388、1986年から同 631 |



第15図 生育観測ほ場の位置

タリン酸吸収係数は常法⁵⁶⁾により測定した。

無機化土壌窒素量は吉野・出井の方法⁹⁴⁾に従って測定した。すなわち、前述の粒径5mm以下の湿潤土壌40gを直径3cm、深さ11cmの有底ガラス管に入れ水15mlを加えて掻き状態に攪拌した後、湛水し、ゴムの密栓をして、ほ場インキュベーション(IV-2参照)と、30°C 10週間静置後、無機化してくるアンモニア態窒素から原土の無機態窒素量を差し引いた値を無機化量とした。原土の一部については硝酸態窒素の測定も実施した。富山県農業技術センターについては、1985年から1991年に同様の培養実験を実施した。面積当りの無機化土壌窒素量は、IV-3と同様の方法で計算した。

富山県農業技術センターの水田作土の地温を白金抵抗温度計によって測定し、これを密栓ほ場インキュベーション時の土壌温度とした。温度指標として金野らの反応速度論的方法³³⁾に基づいて25°Cに変換した日数を使用し、見かけの活性化エネルギー(E_a)は20,000calとした。

地温以外の気象データは富山地方気象台の資料⁷³⁾を使用した。

(2) 結果

供試土壌の理化学性と無機化土壌窒素量は第36表に示

した通りである。各土壌の粘土含量は、灰色低地土では入善、立山、婦中および農業技術センターの県中央から東部のほ場が10%以下と低く、県西部は15~20%とやや高い傾向がみられた。供試土壌のうち粘土含量の最も多かったものは、黄色土の大沢野の35.8%であった。グライ土、黒ボク土は17~30%であった。陽イオン交換容量(CEC)は、灰色低地土ではいずれの土壌も $14\text{cmol}(+)\text{kg}^{-1}$ 以下で4土壌群中最も低く、黄色土や黒ボク土ではほとんどの土壌で $20\text{cmol}(+)\text{kg}^{-1}$ 以上と高く、グライ土では福岡が $20\text{cmol}(+)\text{kg}^{-1}$ 以上であったほかはそれほど大きな値を示さなかった。全炭素含量(T-C)は黒ボク土が $40\sim70\text{kgkg}^{-1}$ と高く、グライ土がこれに次ぎ、灰色低地土では 25kgkg^{-1} 以下と低かった。また黄色土の全炭素含量は、ほ場間差が大きかった。

30°C10週間インキュベーションによる土壌窒素の無機化量は、灰色低地土の場合、入善が 28.8mgkg^{-1} 乾土とかなり低かったほかは、 $43.1\sim54.1\text{mgkg}^{-1}$ 乾土の範囲にあり、グライ土では福岡が 86.9mgkg^{-1} 乾土と高かったほかは灰色低地土よりやや高い程度であった。黄色土では大沢野が 88.6mgkg^{-1} 乾土と高かったが、八尾と井波はそれほど高い値を示さなかった。黒ボク土の無機化量は $52.6\sim69.9\text{mgkg}^{-1}$ 乾土の範囲にあった。

第36表 供試土壌の理化学性と土壌無機化窒素量

| 土 壌 群 | 地区名 | 粒 径 組 成 (%) | | | | 土 性 | pH | CEC (cmol(+)kg ⁻¹) | T-C (%) | T-N (%) | リ 酸 吸 収 係 数 | NH ₄ -N* 30°C10W (mgkg ⁻¹) |
|-----------------------|----------------|-------------|------|------|------|--------|-----|-----------------------------------|------------|------------|----------------------------|---|
| | | 粗砂 | 細砂 | シルト | 粘土 | | | | | | | |
| 灰 色 低 地 土 | 入善部山南中岡波矢部七農技セ | 26.2 | 49.1 | 15.9 | 8.8 | SL | 6.2 | 6.0 | 1.55 | 0.11 | 313 | 28.8 |
| | | 27.0 | 38.2 | 22.5 | 12.3 | SL | 6.4 | 8.4 | 1.75 | 0.13 | 565 | 43.1 |
| | | 29.1 | 44.8 | 18.7 | 7.4 | SL | 6.0 | 8.4 | 2.22 | 0.18 | 617 | 45.2 |
| | | 14.5 | 40.8 | 31.2 | 13.5 | L | 6.0 | 9.7 | 2.02 | 0.18 | 739 | 52.4 |
| | | 37.9 | 42.4 | 10.7 | 9.0 | SL | 5.8 | 12.9 | 1.77 | 0.20 | 591 | 50.7 |
| | | 16.8 | 30.0 | 36.4 | 16.8 | CL | 6.4 | 11.2 | 2.45 | 0.19 | 600 | 47.7 |
| | | 14.0 | 33.8 | 32.3 | 19.9 | CL | 6.1 | 10.4 | 1.66 | 0.15 | 635 | 54.1 |
| | | 22.9 | 32.4 | 30.1 | 14.6 | L | 6.2 | 13.6 | 2.38 | 0.20 | 722 | 53.8 |
| | | 25.9 | 40.8 | 23.7 | 9.6 | SL | 6.1 | 6.5 | 1.93 | 0.16 | 609 | 43.7 |
| グ ラ イ 土 | 富山北杉岡見 | 21.4 | 29.2 | 32.8 | 16.6 | CL | 5.6 | 14.0 | 4.14 | 0.32 | 1017 | 59.0 |
| | | 4.0 | 41.6 | 29.6 | 24.8 | CL | 6.4 | 13.1 | 4.02 | 0.36 | 1043 | 58.0 |
| | | 6.3 | 39.8 | 27.1 | 26.8 | LiC | 6.3 | 21.6 | 2.37 | 0.21 | 1122 | 86.9 |
| | | 25.7 | 38.1 | 17.5 | 18.7 | SCL | 6.4 | 13.0 | 2.47 | 0.19 | 661 | 49.4 |
| 黄 色 土 | 大沢野八尾波 | 4.8 | 20.6 | 38.8 | 35.8 | LiC | 6.0 | 23.5 | 3.15 | 0.26 | 1826 | 88.6 |
| | | 31.7 | 24.1 | 15.6 | 27.6 | SC | 6.3 | 39.2 | 1.49 | 0.13 | 1391 | 53.5 |
| | | 6.1 | 21.5 | 44.8 | 27.6 | LiC | 5.9 | 22.6 | 2.67 | 0.22 | 1304 | 62.4 |
| 黒 お ク 土 | 魚津市光福 | 5.5 | 18.6 | 48.5 | 27.4 | SiC | 6.2 | 27.3 | 6.97 | 0.35 | 1844 | 52.6 |
| | | 14.7 | 23.3 | 38.4 | 23.6 | CL | 6.2 | 18.8 | 4.93 | 0.37 | 1565 | 60.4 |
| | | 15.4 | 20.4 | 35.9 | 30.3 | LiC | 6.5 | 24.7 | 4.27 | 0.39 | 1287 | 69.9 |

*:生土30°C10週間インキュベーション

第37表 土壌の理化学的性質と無機化土壌窒素量の相関関係(r)

| 相関係数 | |
|---------|-------|
| 粘 土 含 量 | 0.782 |
| C E C | 0.534 |
| T - C | 0.285 |
| T - N | 0.467 |
| リ酸吸収係数 | 0.674 |

無機化土壌窒素量と土壌の理化学性との関係は第37表に示した通りである。粘土含量、リン酸吸収係数との間に高い正の相関 ($r=0.782$ 、 0.674 、 $n=19$) が、陽イオン交換容量、全窒素、全炭素との間にもそれぞれ正の相関関係 ($r=0.534$ 、 0.467 、 0.285 、 $n=19$) が認められた。

粘土含量、リン酸吸収係数、陽イオン交換容量、全窒素を説明変数とした重回帰式では寄与率が0.694であった。

第38、39表に示すように、生育観測ほ場の土壌の無機化窒素量は成熟期の全土壌平均の平年値で 53.8 mg kg^{-1} 乾土であった。成熟期無機化量の土壌別の平年値は、最も小さい黒部土壌で 33.7 mg kg^{-1} 乾土、最も大きい福岡土壌で 79.2 mg kg^{-1} 乾土に達した。土壌グループ間で比較すると、灰色低地土の窒素無機化量が平均で 42.8 mg kg^{-1} 乾土とやや小さく、グライ土、黄色土、黒ボク土の無機化量はいずれも 59 mg kg^{-1} 乾土付近であった。しかし同一グループの中でも、土壌別の無機化窒素量にはかなり大きな変異があった。

第40表には原土中のアンモニア態窒素の平年値を示した。その値は土壌により $2.4 \sim 7.7 \text{ mg kg}^{-1}$ 乾土で、全平均値では 5.1 mg kg^{-1} 乾土程度であった。また、第41表に示したように、原土中の硝酸態窒素の平年値は、土壌によって $5.9 \sim 21.8 \text{ mg kg}^{-1}$ 乾土の範囲で変化し、平均値は 9.2

第38表 ほ場の温度経過と灰色低地土のほ場インキュベーションによる無機化土壌窒素量 (mgkg⁻¹)

| 年度 | 月・日 | 25°C日数 | 灰色低地土 | | | | | | | | | | 全体 平均 |
|------|------|--------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|----------|
| | | | 高岡 | 黒部 | 小矢部 | 入善 | 農試 | 婦中 | 富山南 | 立山 | 砺波 | 平均 | |
| 1989 | 6.13 | 22 | 24.0 | 11.8 | 15.3 | 13.1 | 14.6 | 28.0 | 24.9 | 23.5 | 17.9 | 19.2 | 21.4 |
| | 7.03 | 35 | 34.6 | 12.2 | 20.2 | 17.2 | 14.1 | 41.9 | 28.4 | 25.3 | 26.1 | 24.4 | 29.2 |
| | 7.23 | 51 | 43.7 | 15.0 | 34.8 | 24.4 | 22.0 | 48.7 | 32.8 | 28.6 | 37.7 | 32.0 | 38.3 |
| | 8.15 | 73 | 52.5 | 22.6 | 38.4 | 36.8 | 25.0 | 50.3 | 46.0 | 45.3 | 49.3 | 40.7 | 48.0 |
| | 9.12 | 96 | 72.0 | 35.6 | 53.9 | 41.1 | 45.2 | 77.6 | 58.6 | 63.5 | 50.1 | 55.3 | 64.6 |
| 1988 | 6.13 | 21 | 16.9 | 10.6 | | 14.6 | 12.4 | 26.2 | 14.0 | 23.0 | | 16.8 | 17.1 |
| | 7.03 | 37 | 16.1 | 10.9 | | 15.2 | 17.3 | 31.2 | 19.7 | 24.2 | | 19.2 | 20.1 |
| | 7.23 | 52 | 21.3 | 14.3 | | 22.6 | 24.0 | 42.5 | 22.7 | 28.4 | | 25.1 | 26.8 |
| | 8.10 | 67 | 34.9 | 22.0 | | 23.8 | 26.9 | 52.9 | 34.9 | 36.0 | | 33.1 | 35.1 |
| | 9.20 | 97 | 55.6 | 29.4 | | 43.5 | 33.9 | 71.9 | 58.0 | 52.8 | | 49.3 | 54.3 |
| 1987 | 6.13 | 27 | 1.6 | 5.0 | 18.2 | 0.1 | 4.1 | 21.0 | 14.3 | 9.9 | 16.1 | 10.0 | 11.2 |
| | 7.03 | 47 | 13.2 | 11.9 | 32.9 | 5.6 | 15.1 | 42.1 | 31.8 | 20.8 | 39.9 | 23.7 | 24.2 |
| | 7.23 | 67 | 30.2 | 20.9 | 45.5 | 11.1 | 24.8 | 53.3 | 40.3 | 35.1 | 52.7 | 34.9 | 38.3 |
| | 8.04 | 81 | 29.8 | 24.1 | 51.9 | 12.7 | 21.8 | 57.1 | 43.3 | 35.3 | 54.5 | 36.7 | 41.4 |
| | 9.10 | 119 | 43.6 | 37.1 | 64.3 | 28.3 | 43.4 | 70.6 | 55.7 | 48.2 | 67.0 | 50.9 | 56.6 |
| 1986 | 6.13 | 23 | 13.7 | 6.7 | 11.4 | 13.0 | 6.6 | 9.2 | 14.3 | 13.1 | 8.3 | 10.7 | 10.6 |
| | 7.03 | 39 | 19.7 | 11.6 | 25.6 | 18.6 | 14.1 | 15.7 | 18.9 | 17.5 | 18.7 | 17.8 | 18.3 |
| | 7.23 | 54 | 23.1 | 18.9 | 36.9 | 21.1 | 20.0 | 22.2 | 27.6 | 25.4 | 33.7 | 25.4 | 28.7 |
| | 8.08 | 69 | 31.4 | 17.5 | 51.2 | 30.3 | 25.5 | 34.8 | 36.8 | 32.2 | 37.0 | 33.0 | 35.5 |
| | 9.18 | 106 | 39.5 | 22.9 | 68.7 | 24.9 | 37.8 | 39.0 | 38.0 | 37.8 | 46.3 | 39.4 | 42.7 |
| 1985 | 6.13 | 27 | 12.7 | 17.2 | 13.6 | 11.2 | 17.7 | 21.2 | 19.7 | 17.3 | 10.4 | 15.7 | 16.7 |
| | 7.03 | 44 | 18.2 | 20.5 | 20.6 | 11.9 | 24.6 | 26.2 | 22.2 | 25.8 | 16.5 | 20.7 | 23.1 |
| | 7.19 | 58 | 23.8 | 26.9 | 30.4 | 20.4 | 35.2 | 29.3 | 32.2 | 35.1 | 24.9 | 28.7 | 31.7 |
| | 8.08 | 83 | 33.9 | 39.0 | 45.2 | 28.1 | 38.6 | 44.6 | 41.1 | 42.0 | 33.7 | 38.5 | 42.2 |
| | 9.10 | 123 | 39.4 | 43.4 | 48.9 | 33.8 | 43.5 | 42.9 | 45.0 | 45.0 | 43.6 | 42.8 | 50.5 |
| 平均 | 6.13 | 24 | 13.8 | 10.3 | 14.6 | 10.4 | 11.1 | 21.1 | 17.4 | 17.4 | 13.2 | 14.4 | 15.4 |
| | 7.03 | 40 | 20.4 | 13.4 | 24.8 | 13.7 | 17.0 | 31.4 | 24.2 | 22.7 | 25.3 | 21.4 | 23.0 |
| | 7.23 | 57 | 28.4 | 19.2 | 36.9 | 19.9 | 25.2 | 39.2 | 31.1 | 30.5 | 37.3 | 29.7 | 32.7 |
| | 出穂期 | 75 | 36.5 | 25.0 | 46.7 | 26.3 | 27.6 | 49.7 | 40.4 | 38.2 | 43.6 | 36.9 | 40.4 |
| | 成熟期 | 108 | 50.0 | 33.7 | 59.0 | 34.3 | 40.8 | 60.4 | 51.1 | 49.5 | 51.8 | 47.8 | 53.8 |

25°C日数は金野らの方法に従って、みかけの活性化エネルギーを20,000calとして次式により求めた。

$\exp(-20000/1.987/273+T)/\exp(-20000/1.987/(298))$

空欄部分については測定を実施していない。(以下同様)

第39表 グライ土、黄色土、黒ボク土のほ場インキュベーションによる無機化土壌窒素量

(mgkg⁻¹)

| 年度 月・日 | グ ラ イ 土 | | | | | 黄 色 土 | | | | 黒 ボ ク 土 | | | |
|-----------|---------|------|------|-------|------|-------|------|------|------|---------|------|------|------|
| | 小杉 | 氷見 | 富山北 | 福岡 | 平均 | 井波 | 大沢野 | 八尾 | 平均 | 魚津 | 上市 | 福光 | 平均 |
| 1989 6.13 | 29.1 | 19.5 | 18.2 | 32.4 | 24.8 | 15.1 | 34.2 | 23.9 | 24.4 | 18.1 | 19.2 | 23.9 | 20.4 |
| 7.03 | 41.3 | 36.2 | 23.9 | 42.5 | 36.0 | 32.5 | 39.7 | 27.2 | 33.1 | 25.4 | 23.1 | 42.9 | 30.5 |
| 7.23 | 57.4 | 39.5 | 27.8 | 67.0 | 47.9 | 38.9 | 55.1 | 38.1 | 44.0 | 34.2 | 30.4 | 51.4 | 38.7 |
| 8.15 | 63.4 | 48.7 | 32.8 | 67.0 | 53.0 | 48.8 | 68.6 | 42.4 | 53.3 | 50.8 | 45.1 | 79.0 | 58.3 |
| 9.12 | 65.3 | 51.8 | 50.6 | 105.2 | 68.2 | 65.8 | 93.8 | 63.0 | 74.2 | 82.1 | 63.9 | 87.7 | 77.9 |
| 1988 6.13 | 24.7 | | 12.5 | 19.1 | 18.8 | | 16.8 | 13.5 | 15.2 | 19.5 | 11.7 | 21.3 | 17.5 |
| 7.03 | 25.8 | | 21.3 | 21.7 | 22.7 | | 26.4 | 13.5 | 20.0 | 20.5 | 11.5 | 25.6 | 19.2 |
| 7.23 | 35.3 | | 20.2 | 30.7 | 28.7 | | 35.3 | 14.3 | 24.8 | 34.1 | 20.2 | 35.6 | 30.0 |
| 8.10 | 33.9 | | 35.0 | 43.7 | 37.5 | | 43.2 | 23.7 | 33.5 | 41.2 | 27.1 | 47.2 | 38.5 |
| 9.20 | 56.6 | | 47.4 | 69.9 | 58.0 | | 79.5 | 36.6 | 58.1 | 67.7 | 43.1 | 68.8 | 59.9 |
| 1987 6.13 | 17.7 | 12.1 | 8.8 | 18.3 | 14.2 | 9.3 | 15.0 | 7.6 | 10.6 | 4.0 | 9.5 | 20.3 | 11.3 |
| 7.03 | 28.1 | 24.0 | 25.4 | 36.4 | 28.5 | 12.7 | 38.1 | 12.7 | 21.2 | 10.4 | 29.0 | 28.8 | 22.7 |
| 7.23 | 53.0 | 34.3 | 37.3 | 54.3 | 44.7 | 27.5 | 54.5 | 30.5 | 37.5 | 29.0 | 31.4 | 61.1 | 40.5 |
| 8.04 | 51.1 | 33.5 | 41.3 | 63.2 | 47.3 | 33.3 | 68.6 | 31.1 | 44.3 | 25.2 | 33.1 | 75.7 | 44.7 |
| 9.10 | 71.5 | 48.1 | 58.4 | 79.8 | 64.5 | 45.3 | 83.6 | 42.1 | 57.0 | 41.9 | 50.4 | 96.9 | 63.1 |
| 1986 6.13 | 7.3 | 9.0 | 11.4 | 20.3 | 12.0 | 7.7 | 15.3 | 13.5 | 12.2 | 7.9 | 7.4 | 4.9 | 6.7 |
| 7.03 | 9.5 | 16.7 | 20.5 | 30.2 | 19.2 | 19.0 | 23.2 | 23.6 | 21.9 | 12.0 | 18.8 | 14.6 | 15.1 |
| 7.23 | 21.3 | 22.5 | 29.8 | 40.0 | 28.4 | 37.9 | 46.8 | 46.4 | 43.7 | 20.4 | 25.5 | 25.4 | 23.8 |
| 8.08 | 32.0 | 32.1 | 39.9 | 47.0 | 37.8 | 41.2 | 51.1 | 36.4 | 42.9 | 25.8 | 34.6 | 36.8 | 32.4 |
| 9.18 | 37.9 | 34.0 | 45.7 | 63.6 | 45.3 | 42.8 | 64.8 | 50.8 | 52.8 | 32.1 | 42.2 | 42.6 | 39.0 |
| 1985 6.13 | 20.8 | 15.7 | 16.5 | 31.7 | 21.2 | 4.3 | 16.1 | 15.6 | 12.0 | 18.1 | 17.8 | 19.5 | 18.5 |
| 7.03 | 28.4 | 24.4 | 26.5 | 42.7 | 30.5 | 11.5 | 20.7 | 17.7 | 18.7 | 20.5 | 25.6 | 28.9 | 25.0 |
| 7.19 | 37.0 | 26.7 | 29.5 | 58.1 | 37.8 | 27.9 | 40.3 | 26.6 | 31.6 | 27.5 | 32.4 | 38.4 | 32.8 |
| 8.08 | 48.0 | 40.1 | 36.0 | 69.8 | 48.5 | 30.7 | 59.5 | 36.1 | 42.1 | 38.4 | 44.7 | 51.8 | 45.0 |
| 9.10 | 59.0 | 59.5 | 50.5 | 77.5 | 61.6 | 42.1 | 73.9 | 49.4 | 55.1 | 46.7 | 51.4 | 64.4 | 54.2 |
| 平均 6.13 | 19.9 | 14.1 | 13.5 | 24.4 | 18.0 | 9.1 | 19.5 | 14.8 | 14.5 | 13.5 | 13.1 | 18.0 | 14.9 |
| 7.03 | 26.6 | 25.3 | 23.5 | 34.7 | 27.5 | 18.9 | 30.9 | 18.9 | 22.9 | 17.8 | 21.6 | 28.2 | 22.5 |
| 7.23 | 40.8 | 30.8 | 28.9 | 50.0 | 37.6 | 33.1 | 46.4 | 31.2 | 36.9 | 29.0 | 28.0 | 42.4 | 33.1 |
| 出穂期 | 45.7 | 38.6 | 37.0 | 58.1 | 44.9 | 38.5 | 58.2 | 33.9 | 43.5 | 36.3 | 36.9 | 58.1 | 43.8 |
| 成熟期 | 58.1 | 48.4 | 50.5 | 79.2 | 59.0 | 49.0 | 79.1 | 48.4 | 58.8 | 54.1 | 50.2 | 72.1 | 58.8 |

第40表 原土中のアンモニア態窒素含有量

(mgkg⁻¹)

| 年度 | 灰 色 低 地 土 | | | | | | | | | | 全体 平均 |
|------|-----------|-----|------|------|------|------|-----|------|------|------|----------|
| | 高岡 | 黒部 | 小矢部 | 入善 | 農試 | 婦中 | 富山南 | 立山 | 砺波 | 平均 | |
| 1989 | 0.0 | 0.0 | 1.7 | 1.2 | 0.9 | 2.4 | 0.0 | 4.3 | 0.4 | 1.2 | 2.3 |
| 1988 | 6.8 | 0.4 | - | 1.4 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 1.2 | - | 1.4 | 1.3 |
| 1987 | 21.3 | 8.2 | 10.2 | 11.9 | 11.3 | 14.6 | 8.7 | 14.6 | 18.3 | 13.2 | 12.0 |
| 1986 | 1.7 | 4.1 | 3.4 | 0.8 | 1.8 | 6.6 | 2.1 | 3.3 | 10.0 | 3.8 | 6.2 |
| 1985 | 2.1 | 0.4 | 0.2 | 0.8 | 0.0 | 2.5 | 1.1 | 8.9 | 2.0 | 2.0 | 2.5 |
| 平均 | 6.4 | 2.6 | 3.9 | 3.2 | 2.8 | 5.2 | 2.4 | 6.5 | 7.7 | 4.5 | 5.1 |

| グ ラ イ 土 | | | | | 黄 色 土 | | | | 黒 ボ ク 土 | | | | |
|---------|------|-----|-----|------|-------|-----|------|-----|---------|------|-----|------|------|
| 小杉 | 氷見 | 富山北 | 福岡 | 平均 | 井波 | 大沢野 | 八尾 | 平均 | 魚津 | 上市 | 福光 | 平均 | |
| 1989 | 1.1 | 5.5 | 1.8 | 0.8 | 2.3 | 1.0 | 10.6 | 5.3 | 5.6 | 1.9 | 1.8 | 3.9 | 2.5 |
| 1988 | 1.4 | | 1.2 | 1.3 | 1.3 | | 2.0 | 0.0 | 1.0 | 0.2 | 3.0 | 1.1 | 1.4 |
| 1987 | 13.0 | 8.2 | 9.3 | 9.5 | 10.0 | 9.6 | 11.3 | 9.6 | 10.2 | 11.5 | 9.8 | 16.9 | 12.7 |
| 1986 | 17.8 | 6.8 | 3.0 | 13.5 | 10.3 | 9.1 | 10.5 | 8.5 | 9.4 | 3.4 | 2.9 | 9.1 | 5.1 |
| 1985 | 2.3 | 1.9 | 0.0 | 1.3 | 1.4 | 9.9 | 0.0 | 8.7 | 6.2 | 0.3 | 0.0 | 4.2 | 1.5 |
| 平均 | 7.1 | 5.6 | 3.1 | 5.3 | 5.3 | 7.4 | 6.9 | 6.4 | 6.9 | 3.5 | 3.5 | 7.0 | 4.7 |

第41表 原土中の硝酸態窒素含有量

(mgkg⁻¹)

| 年度 | 灰 色 | | | | 低 地 土 | | | | | | 全体 平均 |
|------|------|------|------|------|-------|------|------|------|------|------|----------|
| | 高岡 | 黒部 | 小矢部 | 入善 | 農試 | 婦中 | 富山南 | 立山 | 砺波 | 平均 | |
| 1988 | 0.7 | 0.0 | | 0.0 | 1.0 | 0.0 | 9.8 | 0.0 | | 1.6 | 4.2 |
| 1987 | 11.9 | 24.2 | 19.8 | 17.9 | 11.9 | 16.1 | 22.1 | 15.9 | 13.6 | 17.0 | 16.0 |
| 1986 | 15.4 | 1.7 | 5.4 | 10.1 | 11.5 | 6.4 | 17.3 | 7.0 | 3.9 | 8.7 | 9.8 |
| 1985 | 8.0 | 9.8 | 6.4 | 4.3 | 3.6 | 9.2 | 12.1 | 1.5 | 5.4 | 6.7 | 6.8 |
| 平均 | 9.0 | 8.9 | 10.5 | 8.1 | 7.0 | 7.9 | 15.3 | 6.1 | 7.6 | 8.5 | 9.2 |

| グ ラ イ 土 | | | | | 黄 色 土 | | | | 黒 ボ ク 土 | | | | |
|---------|------|-----|------|------|-------|------|------|------|---------|------|------|------|------|
| 小杉 | 氷見 | 富山北 | 福岡 | 平均 | 井波 | 大沢野 | 八尾 | 平均 | 魚津 | 上市 | 福光 | 平均 | |
| 1988 | 0.0 | | 23.7 | 4.3 | 9.3 | | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 10.1 | 14.0 | 8.0 |
| 1987 | 10.1 | 9.3 | 25.1 | 11.1 | 13.9 | 13.8 | 12.1 | 13.3 | 13.1 | 16.6 | 25.1 | 14.1 | 18.6 |
| 1986 | 8.0 | 7.8 | 19.8 | 6.9 | 10.6 | 6.3 | 8.0 | 6.3 | 6.9 | 18.0 | 16.7 | 9.4 | 14.7 |
| 1985 | 5.4 | 0.0 | 18.7 | 6.3 | 7.6 | 1.3 | 4.7 | 1.1 | 2.4 | 5.6 | 12.6 | 12.4 | 10.2 |
| 平均 | 5.9 | 5.7 | 21.8 | 7.2 | 10.4 | 7.1 | 6.2 | 5.2 | 5.6 | 10.1 | 16.1 | 12.5 | 12.9 |

mg kg^{-1} 乾土であった。

富山県農業技術センター土壌の7年間の窒素無機化経過を第42表に示した。年度により無機化量が変動することが観察され、成熟期の無機化量の最大値は最小値の1.50倍(A区)~1.44倍(B区)になった。前述の生育観測ほ場の土壌についても、年度による変動が認められ(第38、39表)、最大の年の成熟期の無機化量は最小の年の値の1.28~2.27倍に達した。各土壌で無機化量が最大になった年と最小の年の比は、成熟期平均で1.51、6月13日の平均では2.02であった。

各年度のほ場の温度経過を第16図に示した。9月15日の 25°C 日数積算値は、年によって30日程度変化した。原土中のアンモニア態窒素の年度間の変動は、無機化窒素量の変動より大きく(第40表)、最大年と最小年の比は全土壌平均で10倍近くに達した。原土中の硝酸態窒素(第41表)は、測定限界以下になった場合も多い。全土壌の平均値が最も大きい年の硝酸態窒素は最小年の4倍近くに達した。なお、 25°C の日数と従来から比較的広く使われてきた他の温度指標、例えば吉野・出井⁹⁴⁾の有効積算温度あるいは羽生の有効積算温度示数(高橋ら⁶⁵⁾)との間には、第17図に示すように直線的な対応関係がみられた。従って、後述する解析結果は、上記の別の指標を

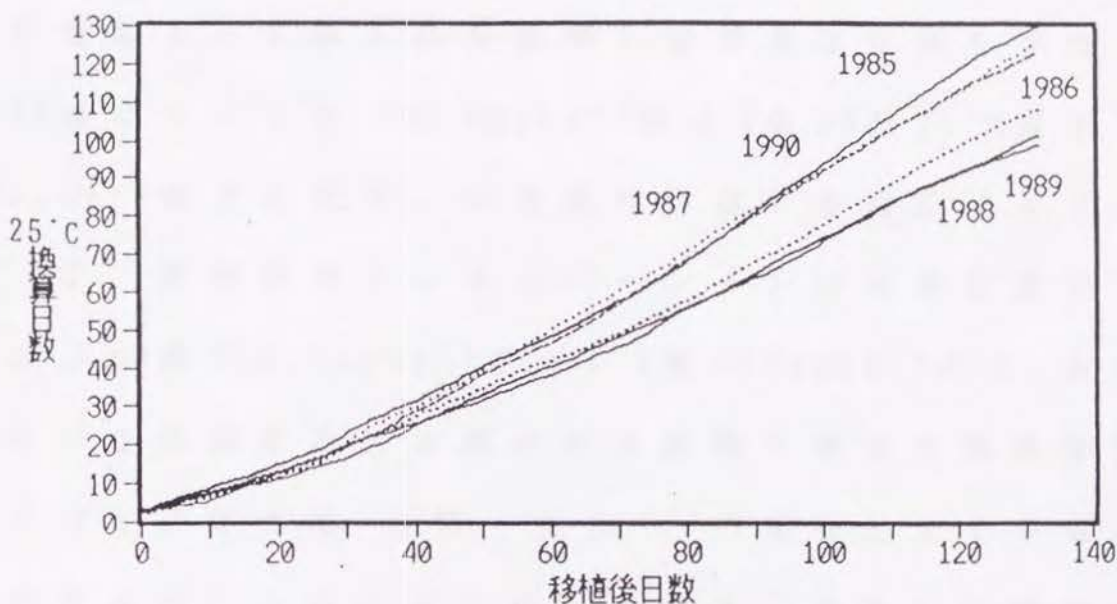
第 4 2 表 富山県農業技術センターほ場における 7 年間にわたる土壌窒素の無機化経過の測定結果

| (mgkg ⁻¹) | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------|-------|------|-------|--------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|--------|
| 測定時期 | 1991年 | | 1990年 | | 1989年 | | 1988年 | | 1987年 | | 1986年 | | 1985年 | |
| | A区 | B区 | A区 | B区 | A区 | B区 | A区 | B区 | A区 | B区 | A区 | B区 | A区 | B区 |
| 6.13 | 11.5 | 10.9 | 0.3 | 8.7 | 15.6 | 14.6 | 6.7 | 12.4 | 5.9 | 4.1 | 12.3 | 6.6 | 15.8 | 17.7 |
| 7.03 | 12.8 | 20.6 | | | 21.3 | 14.1 | 9.7 | 17.3 | 17.3 | 15.1 | 20.2 | 14.1 | 23.5 | 24.6 |
| 7.23 | 25.6 | 26.8 | (9.9 | 26.7)* | 24.3 | 22.0 | 17.7 | 24.0 | 21.2 | 24.8 | 27.3 | 20.2 | (34.2 | 35.2)* |
| 出穂期 | 27.6 | 33.1 | 21.4 | 34.3 | 32.5 | 25.0 | 21.3 | 26.9 | 25.1 | 21.8 | 29.3 | 25.5 | 40.7 | 38.6 |
| 成熟期 | 41.4 | 45.4 | 38.8 | 48.9 | 45.4 | 45.2 | 31.4 | 33.9 | 33.4 | 43.4 | 41.0 | 37.8 | 47.0 | 43.5 |
| ----- | | | | | | | | | | | | | | |
| 30°C4W* | 16.9 | 18.6 | 10.0 | 16.8 | | | 18.5 | 23.0 | 23.1 | 20.4 | 17.9 | 19.1 | 31.6 | 25.7 |
| 30°C10W | 39.1 | 47.4 | 29.1 | 39.5 | 53.3 | 40.2 | 32.4 | 37.3 | 50.0 | 49.7 | 46.4 | 41.8 | 57.4 | 45.5 |

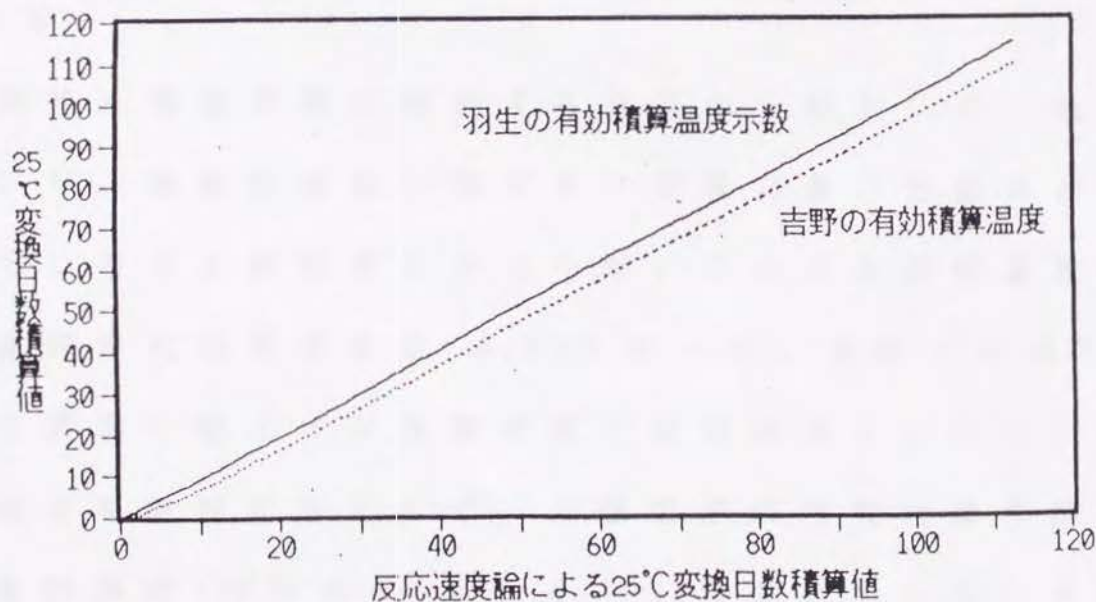
1991年の25°C日数は測定時期の順に、25、43、62、73、111、1990年には、25、53、84、114だった。
A区は前々年に無窒素栽培を実施した区、B区は連年標準の施肥を実施した区画である。

a:7月13日の測定、b:7月19日の測定

*:1Wは1週間



第16図 移植後の25°C日数の年度による変動



第17図 25°C日数に対する吉野の有効積算温度、羽生の積算有効温度示数の関係

用いた場合にも適用できるものと推定された。また、
30°C培養によって得られた無機化窒素量は全体を平均すると10週については 55.8 mg kg^{-1} 乾土(第36表)、4週では 25.9 mg kg^{-1} 乾土となり、温度条件の違いを補正することによって、密栓ほ場インキュベーションの結果と近似した値の、10週： 60.1 mg kg^{-1} 乾土、4週： 27 mg kg^{-1} 乾土が得られた。この結果は、土壌窒素の無機化量は有効積算温度によって決定する吉野・出井⁹⁴⁾の報告とよく一致するものである。このことから、考察には主として密栓ほ場インキュベーションによって得られたデータを使用した。

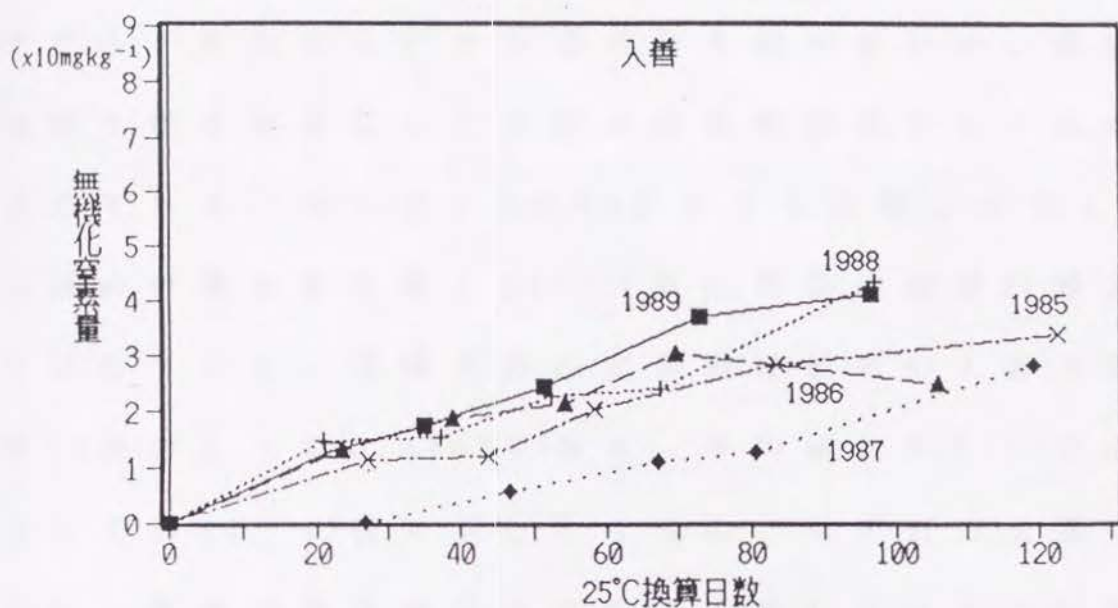
(3) 考察

無機化土壌窒素量に関係する要因の一部として、粘土含量、リン酸吸収係数、陽イオン交換容量、全窒素が関与していることが明らかとなった。これらを説明変数とした重回帰式の寄与率は0.69であった。吉野・出井⁹⁴⁾は、全炭素、陽イオン交換容量、交換性カルシウム、遊離鉄などを説明変数として、土壌窒素の無機化量を推定する重回帰式(寄与率=0.87、 $n=18$)を求めている。本研究の結果は、水田土壌の無機化量の推定の目安になると考えられるが、精度を高めるため、さらに検討が必要で

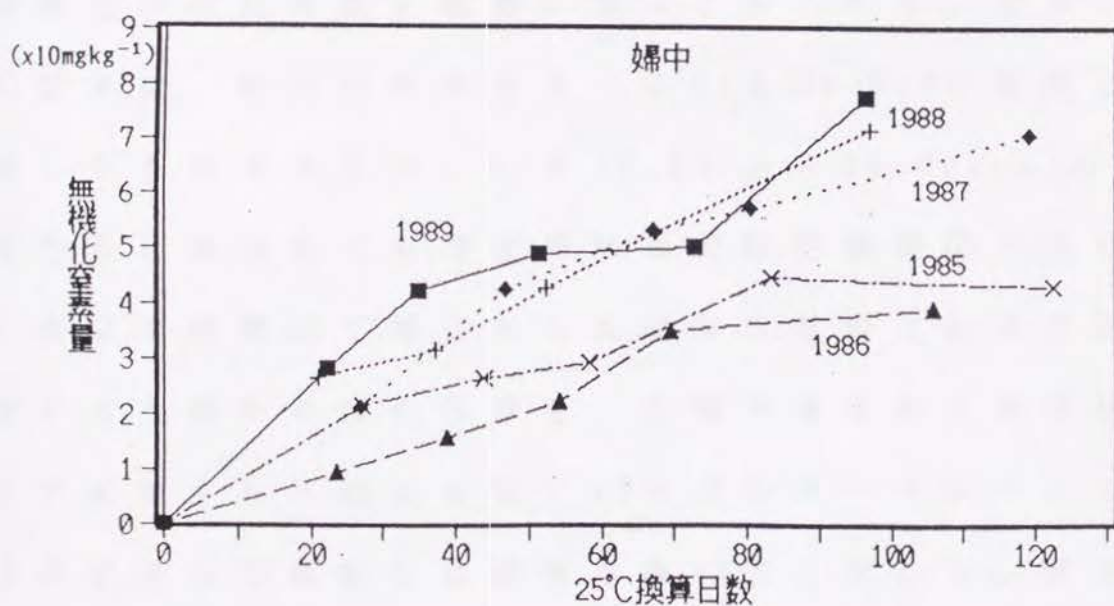
ある。

年度によって土壌窒素の無機化量が変動するという結果が得られたが、水田の地温の年度による変動が原因である可能性もあるので、培養中の 25°C 日数と土壌窒素の無機化経過を比較した。その結果、第18、19図に示したように温度条件を基準化して表示した場合でも、土壌窒素の無機化では年度間の変動が残ることが認められた。また、年度間の比較でも、第40表に示す 25°C 日数と土壌窒素無機化量の大小の間に特別な対応関係は認められなかった。以上のことから、温度以外の要因が無機化土壌窒素量の年度間の変動に関係しているとみられる。

土壌窒素の無機化は温度の影響を受ける。従って、年度によるその変動を解析するためには、温度と土壌窒素の無機化経過の関係をモデル化しておく必要がある。第18および19図から、初期の無機化速度はやや大きい場合が多く、速度の年度間変動も中期以後の無機化速度の年度間変動に較べてやや大きかった。吉野・出井⁹⁴⁾は、土壌試料に前処理をほどこすと初期の無機化に大きな変化が生ずるが、その後の窒素無機化はほぼ一定速度になることを認めている。鳥山⁷¹⁾は、本研究で観察された初期の無機化と中期以後の無機化に相当するものを、phase I と phase II とに分けている。このような土壌窒素



第 18 図 入善土壌の無機化窒素量の年度による変動



第 19 図 婦中土壌の無機化窒素量の年度による変動

の無機化を表す場合に、反応の進行に伴って速度が低下する1次反応モデルを適用した例が多いが、斎藤⁵³⁾は畑土壌を対象にして反応が直線的に進むモデルを当てはめている。そこで、6月13日までを初期とみなして、以後の窒素無機化量と25°C日数の関係に直線回帰式を当てはめてみた。回帰式の決定係数は最低の入善土壌でも第43表のように0.8703であり、平均値は0.9275であった。そして第44、45表に示したように、いずれの土壌においても、直線回帰式がデータをよく表していると判定された。この回帰式の係数は、初期を除く期間の25°C日当りの窒素無機化速度を表す指標であり、以下これを窒素無機化速度係数と記す。回帰式の切片の値は、初期の窒素無機化の程度を表す指標になるとみられる。なお、以上の計算は、始めに述べたようにEaを20,000と仮定して実施したものであるが、Eaを10,000から30,000calの間で変化させた場合でもほぼ同様な直線回帰関係が得られた。

前記の回帰式で得られた土壌窒素無機化を表す係数に対する土壌や年度の関係を、欠測のある地点やほ場が途中で変更された地点を除く12地点のデータについて分散分析によって解析した結果を第46表に示した。無機化速度係数については、土壌および年度がともに有意な要因だと認められた。切片の値は、年度により有意に変動す

第43表 土壤窒素の無機化経過を表す回帰直線の切片、決定係数、
初期無機化量の平年値

| 土壌グループ | ほ場地点 | 切片 (g kg^{-1}) | 決定係数 | 無機化速度係数 ($\text{g} \cdot 10^{-6} \text{ kg}^{-1} 25^\circ \text{C 日}^{-1}$) | 初期無機化量 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} 25^\circ \text{C 日}^{-1}$) |
|--------|------|------------------------------|--------|--|--|
| 灰色低地土 | 高岡 | 3.36 | 0.9520 | 44.2 | 15.0 |
| | 黒部 | 2.90 | 0.9261 | 28.4 | 10.7 |
| | 小矢部 | 4.28 | 0.9532 | 52.2 | 14.7 |
| | 入善 | 2.96 | 0.8703 | 29.9 | 11.3 |
| | 農試 | 3.46 | 0.9334 | 34.4 | 11.7 |
| | 婦中 | 12.05 | 0.9077 | 46.8 | 22.4 |
| | 富山南 | 8.14 | 0.9224 | 41.2 | 18.3 |
| | 立山 | 8.01 | 0.9224 | 39.3 | 18.7 |
| | 砺波 | 6.65 | 0.9153 | 44.4 | 13.4 |
| グライ土 | 小杉 | 10.11 | 0.9127 | 46.0 | 21.2 |
| | 氷見 | 7.47 | 0.9176 | 38.3 | 14.4 |
| | 富山北 | 4.68 | 0.9491 | 42.8 | 14.2 |
| | 福岡 | 9.94 | 0.9488 | 65.5 | 25.5 |
| 黄色土 | 井波 | 1.34 | 0.8922 | 46.2 | 9.5 |
| | 大沢野 | 3.49 | 0.9529 | 71.7 | 20.8 |
| | 八尾 | 5.06 | 0.8937 | 40.3 | 15.8 |
| 黒ボク土 | 魚津 | 0.11 | 0.9520 | 50.7 | 14.5 |
| | 上市 | 3.38 | 0.9448 | 44.3 | 13.8 |
| | 福光 | 3.10 | 0.9564 | 66.9 | 18.9 |

第 4 4 表 無機化土壤窒素を表す特性値の土壤グループ別の平均値と
グルーピングの有意性の検定

| 土壤グループ | 切片 (gkg^{-1}) | 決定係数 | 無機化速度係数 ($\text{g} \cdot 10^{-6} \text{kg}^{-1} 25^{\circ}\text{C日}^{-1}$) | 初期無機化量 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} 25^{\circ}\text{C日}^{-1}$) |
|--------|-----------------------------|--------|---|--|
| 灰色低地土 | 5.76 | 0.9225 | 40.1 | 15.2 |
| グライ土 | 8.05 | 0.9320 | 48.1 | 18.8 |
| 黄色土 | 3.30 | 0.9129 | 52.7 | 15.4 |
| 黒ボク土 | 2.20 | 0.9510 | 54.0 | 15.7 |
| 平均 | 5.29 | 0.9275 | 46.0 | 16.1 |
| F 値 | 3.0 | 1.0 | 0.6 | 0.5 |

$F_{1,8}^3$: 10%=2.49, 5%=3.29

第 4 5 表 無機化土壤窒素を表す特性値の年度間の変動

| 年度 | 切片 (gkg^{-1}) | 決定係数 | 無機化速度係数 ($\text{g} \cdot 10^{-6} \text{kg}^{-1} 25^{\circ}\text{C日}^{-1}$) | 初期無機化量 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} 25^{\circ}\text{C日}^{-1}$) |
|------|-----------------------------|--------|---|--|
| 1989 | 9.61 | 0.9394 | 57.7 | 24.2 |
| 1988 | 2.65 | 0.9364 | 49.0 | 20.5 |
| 1987 | 0.13 | 0.9462 | 51.8 | 10.4 |
| 1986 | 1.42 | 0.9107 | 39.7 | 11.3 |
| 1985 | 10.53 | 0.9403 | 37.2 | 15.4 |

るが、土壌の違いの影響は有意でないとみられた。土壌や年度の違いと決定係数の間には有意な関係が認められなかった。6月13日までの無機化速度が 25°C 日で25日間継続するものとして計算した初期の無機化量については、年度および土壌とも有意な変動要因だと判定された。以上のように、温度指標によって基準化した無機化経過の解析によって、土壌窒素の無機化パターンは土壌および年度によって変動することが明らかになった。原土中のアンモニア態窒素量と硝酸態窒素量についても、第46表に示すように年度と土壌の両方が有意な変動要因であるとの結果が得られた。ここで、年度の要因のF値は土壌要因のF値より大きく、年度要因がより重要であることがうかがえる。本研究で供試した土壌は、原則として一定の管理をしているほ場から、一定の方法で採取したものである。それにもかかわらず、土壌窒素の無機化および原土中の無機態窒素量では年度間の変動が認められ、しかもそれは土壌の違いによる変動と同等かそれ以上に大きかった。土壌の種類や培養温度が窒素の無機化に影響することについては数多くの報告があり、土壌中の粘土含量、全窒素等がこれに関連していることは、すでに解析したところである。しかし、一定の管理をしたほ場の土壌でも大きな年度間の変動が生じることについて

第46表 無機化土壤窒素を表す特性値に対する土壤の種類および年度間の変動の有意性の検定

| 項 目 | F 値 | |
|------------|------------|------------|
| | 土 壤 | 年 度 |
| 切 片 | 1.51(n. s) | 9.40(1%) |
| 決 定 係 数 | 0.85(n. s) | 1.03(n. s) |
| 無機化速度係数 | 14.27(1%) | 13.63(1%) |
| 初期無機化量 | 5.16(1%) | 27.84(1%) |
| 原土アンモニア態窒素 | 1.58(5%) | 18.83(1%) |
| 原土硝酸態窒素 | 7.92(1%) | 19.53(1%) |

第47表 各年の原土のアンモニア態および硝酸態窒素と培養開始までの気象要因の相関関係

| 試料 | 要因 | 25°C日数積算値 | | | 降水量 | | |
|-------|----------|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | | 9~4月 | 3~4月 | 4月 | 9~4月 | 3~4月 | 4月 |
| 19点平均 | アンモニア態窒素 | 0.4032 | -0.1016 | -0.1537 | -0.2644 | -0.7715 | -0.9138 |
| | 硝酸態窒素 | 0.4212 | 0.5795 | 0.2090 | -0.2444 | -0.9340 | -0.9940 |
| 農試土壤 | アンモニア態窒素 | 0.2214 | 0.2170 | 0.1476 | -0.6015 | -0.5141 | -0.6911 |
| | 硝酸態窒素 | -0.6391 | 0.2014 | -0.0120 | 0.1449 | -0.9918 | -0.8312 |

は余り注目されていなかった。このことは窒素無機化を予測する上で留意すべき点である。

初期の無機化量の大小を土壌の要因から推定できると都合が良いので、両者の関係などを解析した。切片の値あるいは初期無機化量の平年値は、グライ土がやや大きかったが(第44表)、統計的に土壌グループ間に有意な差はなかった。第36表に示した供試土壌の理化学性と切片の値や初期無機化量の間にも、明瞭な相関関係は認められなかった。黒ボク土は原土中に硝酸態窒素を多く含む傾向が見られ、硝酸態窒素量と全窒素含有率および全炭素含有率との間には低い正の相関($r=0.42$ 、 0.45 、 $n=19$ 、データ略)があった。また、土壌pHとの間には低い負の相関($r=-0.51$ 、 $n=19$)があった。これらの要因は土壌の陰イオン交換容量と関係があるとみられることから、原土中の硝酸態窒素量の大小は土壌からの溶脱と関係があるのではないかと考えられる。

年度によって初期の土壌窒素無機化量が変動することが判明した。そこで、どんな要因がその変動を引き起こしているかを究明する必要がある。各年の初期無機化量や切片の平均値と、培養開始前の 25°C 変換日数積算値や降水量との間には、有意な相関関係は認められなかった。しかし、原土中のアンモニア態および硝酸態窒素量と春

先の降水量との間には、第47表に示したように高い負の相関がみられた。原土中のアンモニア態窒素量と、前年の秋から春にかけての温度との間には相関関係が認められなかったが、降水量との間には負の相関($r = -0.51 \sim -0.69$ 、 $n = 19$)が認められた。富山県農業技術センター原土の硝酸態窒素量と温度との間にも、相関関係がみられなかったが、3月から4月の降水量と硝酸態窒素量の間には高い負の相関がみられた(第47表)。初期無機化量と原土中のアンモニア態および硝酸態窒素量との間には、高い負の相関($r = -0.8 \sim -0.9$ 程度、 $n = 7$)が認められた。このことは初期に無機化する窒素と、原土中ですでに無機態になっている窒素とが密接な関係にあることを示唆している。

乾土効果によって無機化する窒素は、培養以前の土壤の乾燥の影響を受け、比較的短期間で無機化することが知られている。初期の短い期間の無機化が年度によって変動しやすいという上記の結果と一致することから、乾土効果は初期無機化窒素を変動させる要因だとみなすことができる。しかし、本研究に供試した土壤は耕起前のほ場で採取されており、富山県の気象条件では耕起前のほ場の土壤水分が乾土効果が生じるとされる $pF4$ 以上に乾燥するとは考えにくい。北村³²⁾もまた、乾土効果が

発現する程に土壤が乾燥することはないと報告している。培養初期に無機化する土壤窒素の量が年度によって大きく変動することは、水稻収穫跡の土壤でも認められているが（富山県農業技術センター⁷⁴⁾）、この場合においても土壤は乾燥する状況にはない。上野ら⁷⁸⁾は、湿田などでは pF2台の多水分条件でも乾土効果が表れる場合があると述べているが、本研究で供試したほ場の多くは乾田であり、乾田での乾土効果の発現には強い乾燥が必要だと考えられている。以上のようなことから、本研究で観測された初期の無機化量の年度間の変動は、乾土効果以外の要因によると思われる。原土中の硝酸態窒素量は春先の降雨量が大きい年には少なかった。これは硝酸態窒素が溶脱したためであると考えられる。硝酸態窒素は湛水すると土壤中から失われるので、水稻にとっての無機化窒素量は、硝酸になった分だけ小さくなると判断できる。原土中のアンモニア態窒素もまた春先の降雨量との間に負の相関を示している。これが降雨による溶脱に起因するものなのか、それとも無機化が多雨条件下で低下することによるものなのかは明らかでない。原土中のアンモニア態窒素は培養後も土壤中に留って初期に無機化する窒素と類似の行動をとるものとみられるので、土壤窒素の行動を解析する上では初期無機化窒素に含めて

扱ってさしつかえない。

生育観測ほ土壤について、各年の無機化速度係数の平均値と、培養開始前の気象条件との関係を解析した結果、無機化速度係数と前年秋から春にかけての温度または降水量との間にはいずれも有意の関係は認められなかった。無機化速度係数の年度間の変動と最も高い相関係数を示した要因は、前年の水稻の作況指数のみであった($r = -0.76$ 、 $n=19$)。富山県農業技術センター土壤について同様に解析した結果、無機化速度係数と4月または3月から4月の温度との間にそれぞれ $r=0.65$ 、 0.85 と5%で有意の正の相関関係が、また3月から4月の降水量との間には $r = -0.51$ と負の相関が認められた。無機化速度係数と前年の作況指数との間には $r = -0.85$ と5%有意で負の相関関係が認められた。この結果は、水稻生育中期以後の無機化速度も年度によって変動することを示すものであった。従来、初期の土壤窒素の無機化が乾土効果によって変動することは広く認められてきたが、ほぼ一定のほ場管理のもとにある土壤では、中期以後の無機化速度が年度ごとに変動するとの報告はこれまでに見あたらない。無機化される土壤窒素は何らかの形で補給されているはずであるが、その際無機化と補給が量的、时期的に常に均衡しているとは考えにくい。鳥山・飯村⁶⁹⁾は無機化する

土壤窒素量が季節によって変動すると報告している。従って、年度間に変動があると考えの方が合理的である。

12点の土壤における平均の土壤窒素無機化速度係数の年度による変動はCV値で18%となった。この値は成熟期までの25°C日数の変動(CV値で11%)より大きい。このことは、無機化速度係数の年度による変動が、温度の違いに起因する窒素無機化の変動よりも大きいことを示している。最近広く試みられている土壤窒素無機化予測法は、温度の補正をすれば、一定の無機化パターンを異なる年度に適用できることを前提にしている。しかし、本研究の結果からは、このような前提は成り立たないことになった。

無機化土壤窒素量の年度による変動の要因は明らかでないが、前年の水稻の作況指数と高い負の相関関係を示している。作況指数は土壤窒素の収奪量および水田に還元される稲わら量などの指数でもあるので、土壤窒素の無機化速度係数との間に負の相関が存在することは想定しうる。また、無機化速度係数と春先の温度との間には正の相関が、降水量との間には負の相関がそれぞれみられたが、これらの、年度間の変動を判定する要因としての有効性については残された問題である。

2. 各種土壌における無機化窒素の水稲による利用率

第IV章において、復帰田では連作田より無機化土壌窒素量の水稲への利用率が高くなることを述べたが、土壌の種類もまた利用率に影響を与えることが考えられる。そこで、富山県の代表的な水田土壌において、無機化土壌窒素の水稲への利用率について検討する。

(1) 試験研究方法

1987年と1989年に生育観測ほ場(第35表)の作土から湿潤土壌を採取して、 ϕ /5000ワグネルポットにつめ、ポット試験を行った。このポットを無窒素条件で水稲を栽培した富山県農業技術センター210B号田の作土中に埋設し、コシヒカリを稚苗で4本1株植え、無肥料条件で栽培した。成熟期に水稲地上部および地下部を採取して、窒素吸収量をケルダール法によって測定し、前節で求めた無機化土壌窒素と原土のアンモニア態窒素の合計に対する窒素吸収量を求めた。この栽培試験では反復区を設けなかった。

富山県農業技術センターほ場において、1年おきに場所を変えて無窒素栽培するA区を設け、平均的な株の地上部をサンプリングして、乾物重と窒素含有率、窒素吸

収量を測定した。この結果から、ほ場条件下における無機化土壌窒素の利用率を調査した。

(2) 結果

第48、49表に、ポット試験による水稻の乾物重と窒素吸収量を示した。乾物重データで明らかのように、水稻の生育は極めて貧弱であった。これは無窒素で、しかも土壌が制限されているためだと思われる。しかし、地上部の乾物重に対する根部の比率は高く、供試した水稻による窒素吸収能は高かったと推定される。

無機化土壌窒素量とポット試験での水稻による土壌窒素吸収量、土壌窒素の利用率などを第50、51表に示した。同一土壌の無機化窒素利用率が、試験の年度によって大きく異なる場合があるが、これは上記のように水稻の生育が極めて貧弱であったことが一因になったものと考えられる。土壌の種類ごとの無機化窒素利用率は、1点しかサンプルのない1989年の黄色土が特に低い値を示した以外は、統計的に有意差が認められなかった。両年度の試験に共通して供試した土壌について分散分析を行ったところ、窒素利用率と年度および土壌要因の間にはいずれも有意の関係は認められなかった。しかし、個々の無機化窒素利用率の測定値の標準誤差はCV値で25%と変動

第48表 無窒素栽培ポット水稻の生育と窒素吸収 (1987年)

| 土壌 | ほ場地点 | 乾物重(g・pot ⁻¹) | | | 窒素含有率(%) | | | 窒素吸収量 (mg・pot ⁻¹) | 土壌量 (g・pot ⁻¹) |
|------------------|------|---------------------------|------|------|----------|------|------|----------------------------------|-------------------------------|
| | | 穂 | 茎葉 | 根 | 穂 | 茎葉 | 根 | | |
| 灰色 低地 土 | 高岡 | 2.90 | 3.50 | 1.18 | 1.02 | 0.63 | 0.92 | 62 | 2000 |
| | 黒部 | 4.89 | 5.92 | 2.00 | 1.04 | 0.68 | 0.90 | 109 | 2000 |
| | 小矢部 | 3.60 | 4.83 | 1.88 | 1.00 | 0.49 | 1.02 | 79 | 2000 |
| | 入善 | 2.57 | 3.20 | 1.20 | 1.01 | 0.53 | 0.97 | 55 | 2000 |
| | 婦中 | 5.97 | 8.80 | 2.60 | 0.99 | 0.60 | 1.05 | 139 | 1721 |
| | 富山南 | 5.10 | 7.27 | 2.28 | 1.05 | 0.62 | 1.03 | 122 | 2000 |
| | 立山 | 4.23 | 5.41 | 2.72 | 1.07 | 0.63 | 1.03 | 107 | 2000 |
| | 砺波 | 4.93 | 6.22 | 1.72 | 0.95 | 0.58 | 0.94 | 99 | 2000 |
| | 平均 | 4.27 | 5.64 | 1.95 | 1.02 | 0.60 | 0.98 | 97 | |
| グ ラ イ 土 | 小杉 | 5.00 | 6.29 | 1.75 | 0.93 | 0.52 | 0.98 | 96 | 1676 |
| | 氷見 | 5.92 | 5.65 | 1.38 | 1.00 | 0.52 | 0.81 | 100 | 2000 |
| | 富山北 | 4.07 | 5.13 | 1.65 | 1.09 | 0.60 | 1.35 | 97 | 2000 |
| | 福岡 | 4.83 | 7.85 | 2.18 | 0.91 | 0.54 | 0.86 | 105 | 2000 |
| 平均 | 4.96 | 6.23 | 1.74 | 0.98 | 0.55 | 1.00 | 100 | | |
| 黄色 土 | 井波 | 3.72 | 4.29 | 1.00 | 0.99 | 0.55 | 0.90 | 69 | 1855 |
| | 大沢野 | 4.61 | 6.29 | 1.58 | 1.12 | 0.63 | 0.86 | 105 | 2000 |
| | 八尾 | 3.81 | 4.18 | 1.34 | 0.96 | 0.56 | 0.92 | 72 | 2000 |
| | 平均 | 4.05 | 4.92 | 1.31 | 1.02 | 0.58 | 0.89 | 82 | |
| 黒 ボ ク 土 | 魚津 | 4.05 | 4.92 | 1.21 | 1.09 | 0.70 | 0.90 | 89 | 2000 |
| | 上市 | 5.24 | 6.44 | 2.35 | 0.97 | 0.59 | 0.95 | 111 | 2000 |
| | 福光 | 7.14 | 7.24 | 3.30 | 0.89 | 0.61 | 0.99 | 140 | 2000 |
| | 平均 | 5.48 | 6.20 | 2.29 | 0.98 | 0.63 | 0.95 | 114 | |

第49表 無窒素栽培ポット水稻の生育と窒素吸収 (1989年)

| 土壌 | ほ場地点 | 乾物重(g・pot ⁻¹) | | | 窒素含有率(%) | | | 窒素吸収量 (mg・pot ⁻¹) | 土壌量 (g・pot ⁻¹) |
|-------------------|------|---------------------------|------|------|----------|------|------|----------------------------------|-------------------------------|
| | | 穂 | 茎葉 | 根 | 穂 | 茎葉 | 根 | | |
| 灰色 低 地 土 | 高岡 | 4.26 | 3.79 | 1.84 | 1.21 | 0.74 | 0.93 | 97 | 1532 |
| | 小矢部 | 3.21 | 4.28 | 0.92 | 0.88 | 0.54 | 0.82 | 59 | 1789 |
| | 小矢部B | 1.30 | 1.59 | 0.55 | 1.24 | 0.70 | 0.76 | 31 | 2000 |
| | 入善 | 2.74 | 2.96 | 1.05 | 0.66 | 0.30 | 0.80 | 35 | 2000 |
| | 入善B | 1.85 | 0.56 | 0.40 | 0.83 | 0.53 | 0.92 | 27 | 2000 |
| | 農試 | 3.94 | 3.54 | 1.78 | 1.07 | 0.61 | 0.72 | 77 | 2000 |
| | 富山南 | 3.43 | 3.34 | 1.29 | 1.19 | 0.61 | 0.82 | 72 | 1715 |
| | 富山西 | 4.60 | 4.66 | 2.14 | 1.00 | 0.32 | 0.72 | 76 | 1682 |
| | 平均 | 3.17 | 3.22 | 1.25 | 1.01 | 0.54 | 0.81 | 59 | |
| グ ラ イ 土 | 小杉 | 4.47 | 4.76 | 1.84 | 0.85 | 0.51 | 0.65 | 74 | 1448 |
| | 氷見 | 4.57 | 4.93 | 1.93 | 0.88 | 0.57 | 0.87 | 85 | 1985 |
| | 氷見B | 6.55 | 6.47 | 2.23 | 0.91 | 0.48 | 0.73 | 107 | 2000 |
| | 福岡 | 7.70 | 7.70 | 3.78 | 0.98 | 0.43 | 0.53 | 129 | 2000 |
| | 高岡B | 4.47 | 4.21 | 1.87 | 1.21 | 0.69 | 0.71 | 96 | 1919 |
| | 平均 | 5.55 | 5.61 | 2.33 | 0.97 | 0.54 | 0.70 | 98 | |
| 黄色土 | 八尾 | 2.80 | 2.88 | 0.69 | 1.29 | 0.59 | 0.81 | 59 | 2000 |
| 黒 ボ ク 土 | 上市 | 2.40 | 2.46 | 0.59 | 0.68 | 0.61 | 0.89 | 37 | 1428 |
| | 福光 | 7.61 | 7.70 | 2.30 | 1.10 | 0.66 | 0.68 | 150 | 1944 |
| | 福光B | 3.81 | 3.85 | 1.53 | 1.09 | 0.63 | 0.78 | 78 | 2000 |
| | 平均 | 4.61 | 4.67 | 1.47 | 0.96 | 0.63 | 0.78 | 88 | |

Bのついた地点は第35表に示した地点とはほ場が異なる。

第50表 無機化土壌窒素量に対する無窒素栽培ポット水稻の
窒素吸収量の比率

(1987年)

| 土壌 | ほ場地点 | 水稻吸収 (gkg ⁻¹) | 原土NH ₄ -N (gkg ⁻¹) | ほ場培養 (gkg ⁻¹) | 無機化窒素利用率 (%) |
|-----------------------|------|------------------------------|--|------------------------------|-------------------|
| 灰 色 低 地 土 | 高岡 | 31.2 | 21.3 | 43.6 | 48 |
| | 黒部 | 54.6 | 8.2 | 37.1 | 120 |
| | 小矢部 | 39.4 | 10.2 | 64.3 | 53 |
| | 入善 | 27.3 | 11.9 | 28.3 | 68 |
| | 婦中 | 80.9 | 14.6 | 70.6 | 95 |
| | 富山南 | 61.1 | 8.7 | 55.7 | 95 |
| | 立山 | 53.7 | 14.6 | 48.2 | 85 |
| | 砺波 | 49.5 | 18.3 | 67.0 | 58 |
| | 平均 | 49.7 | 13.5 | 51.9 | 78±9 ^a |
| グ ラ イ 土 | 小杉 | 57.5 | 13.0 | 71.5 | 68 |
| | 氷見 | 49.9 | 8.2 | 48.1 | 89 |
| | 富山北 | 48.7 | 9.3 | 58.4 | 72 |
| | 福岡 | 52.5 | 9.5 | 79.8 | 59 |
| | 平均 | 52.2 | 10.2 | 64.5 | 75±7 |
| 黄 色 土 | 井波 | 37.4 | 9.6 | 45.3 | 68 |
| | 大沢野 | 52.4 | 11.3 | 83.6 | 55 |
| | 八尾 | 36.2 | 9.6 | 42.1 | 70 |
| | 平均 | 42.0 | 10.2 | 57.0 | 64±5 |
| 黒 ボ ク 土 | 魚津 | 44.7 | 11.5 | 41.9 | 84 |
| | 上市 | 55.6 | 9.8 | 50.4 | 92 |
| | 福光 | 70.2 | 16.9 | 96.9 | 62 |
| | 平均 | 56.8 | 12.7 | 63.1 | 79±9 |

a: 平均値の標準偏差である。

第 5 1 表 無機化土壌窒素量に対する無窒素栽培ポット水稻の
窒素吸収量の比率

(1989年)

| 土 壌 | ほ場地点 | 水稻吸収N (gkg^{-1}) | 原土 $\text{NH}_4\text{-N}$ (gkg^{-1}) | ほ場培養 (gkg^{-1}) | 無機化窒素利用率 (%) |
|------------------|------|--------------------------------|--|-------------------------------|-----------------|
| 灰 色 低 地 | 高岡 | 63.1 | 0.0 | 72.0 | 88 |
| | 小矢部 | 32.9 | 1.7 | 53.9 | 59 |
| | 小矢部B | 15.7 | 0.0 | 15.4 | 102 |
| | 入善 | 17.7 | 1.2 | 44.1 | 39 |
| | 入善B | 13.7 | 0.0 | 23.9 | 57 |
| | 農技セ | 38.3 | 0.9 | 45.2 | 83 |
| | 富山南 | 41.8 | 0.0 | 58.6 | 71 |
| | 富山西 | 45.4 | 0.0 | 82.4 | 55 |
| | 平均 | 33.6 | 0.5 | 49.4 | 69 ± 6^a |
| グ ラ イ 土 | 小杉 | 51.3 | 1.1 | 65.3 | 77 |
| | 氷見 | 42.9 | 5.5 | 51.8 | 75 |
| | 氷見B | 53.5 | 0.0 | 78.3 | 68 |
| | 福岡 | 64.3 | 0.8 | 105.2 | 61 |
| | 高岡B | 50.2 | 1.2 | 66.9 | 74 |
| | 平均 | 52.2 | 1.7 | 73.5 | 72 ± 3 |
| 黄色土 | 八尾 | 29.4 | 5.3 | 63.0 | 43 |
| 黒 ボ ク 土 | 上市 | 25.6 | 1.8 | 63.9 | 39 |
| | 福光 | 77.2 | 3.9 | 87.7 | 84 |
| | 福光B | 38.9 | 0.0 | 52.5 | 74 |
| | 平均 | 47.2 | 1.9 | 68.0 | 66 ± 14 |

Bのついた地点は第 3 5 表に示した地点とはほ場が異なる。

a: 平均値の標準偏差である。

が大きいので、土壌や年度による利用率の違いが誤差に隠されている可能性は否定できない。年度と土壌をこみにして計算した無機化窒素利用率は $69 \pm 7\%$ (平均値 $\pm 2\sigma$) になった。

富山県農業技術センターほ場に無窒素条件で栽培した試験による水稻の窒素吸収量と、無機化土壌窒素量との関係を第52表に示した。無機化した土壌窒素の利用率は年度により51から94%の範囲で変化し、平均値が67%で、上記のポット試験で得られた平均値の69%と一致していた。なおここでは水稻の地下部が吸収した窒素は計算に含めていない。同一ほ場における過去の測定例⁷²⁾によると、無窒素栽培水稻の地下部に含まれる窒素量は地上部が吸収した窒素の約6%であった。そこで、この数値を用いて計算すると、地下部を含む水稻の土壌窒素利用率は71%になる。

(3) 考察

無機化した土壌窒素の水稻による利用率は、平均で約70%という値が得られた。この値を重窒素トレーサー法によって得られた施肥窒素の利用率と比較して考察する。

慣例に従えば見かけの無機化窒素量、つまり総無機化量から有機化された窒素を差し引いた値を無機化土壌窒

第52表 無窒素栽培ほ場に生育した水稻の窒素吸収と無機化土壌窒素量の関係

| 年度 | 無窒素水稻 の窒素吸収 (gm^{-2}) | 無機化土壌窒素 (成熟期) (gkg^{-1}) | 原土壌中の $\text{NH}_4\text{-N}$ (gkg^{-1}) | 土壌窒素の 利用率 (%) |
|------|--|---|--|---------------------|
| 1991 | 4.68 | 43.4 | 4.6 | 51 |
| 1990 | 5.71 | 43.9 | 6.4 | 59 |
| 1989 | 4.96 | 45.3 | 0.5 | 56 |
| 1988 | 6.07 | 32.7 | 1.0 | 94 |
| 1987 | 5.62 | 38.4 | 9.5 | 61 |
| 1986 | 7.05 | 39.4 | 1.8 | 89 |
| 1985 | 5.15 | 45.3 | 1.3 | 58 |
| 平均 | 5.61 | 41.2 | 3.6 | 67 ± 12^a |

下層土の無機化窒素は3年間の測定の平均から作土の27%とした。
作土深は17.9cmとし、仮比重を0.94とし、下層土の量は作土の1/2とした。
a:平均値の範囲(2σ)を示す。

第53表 トレーサー窒素の行動から求めた無機化土壌窒素の利用率の推定値

| | 田植期 | 最高分けつ期 | 出穂期 | 成熟期 | 全体 |
|------------------|-----|--------|-----|------|----|
| トレーサー窒素利用率(%) | 26 | 60 | 60 | 54 | |
| トレーサー窒素有機化率(%) | 32 | 15 | 15 | 10 | |
| 25°C日数 | 0 | 32 | 75 | 108 | |
| 利用率期間平均値(%) | | 43 | 60 | 57 | 54 |
| 有機化率期間平均値(%) | | 23.5 | 15 | 12.5 | 17 |
| 25°C日数(期間あたり) | | 32 | 43 | 33 | |
| 無機化土壌窒素利用率推定値(%) | | 56 | 71 | 65 | 65 |

無機化土壌窒素利用率推定値=利用率期間平均値/(利用率期間平均値+有機化率期間平均値)
×100

素量とした場合、利用率を表すために見かけの無機化量を分母として用いる。一方、トレーサー法では施用全窒素量を分母とするのが通例で、その中に有機化される部分を含んでいる。従って、トレーサー窒素の利用率を見かけの無機化窒素の利用率と同列で比較することは困難である。しかし、有機化速度がトレーサー窒素の施用によってそれほど変化しないと仮定すれば、有機化した部分を除いて計算することによって、トレーサー窒素の利用率を無機化土壌窒素の利用率と比較することが可能になると思われる。そこで、章Ⅱ-1で得られた結果および廣川らによる測定の結果^{15, 16, 17)}を、有機化された部分を除いた形に改めるため次の計算を行った。トレーサー窒素が一定速度で注入される条件、すなわち、土壌窒素の無機化速度が一定であり、初期には基肥トレーサー窒素と同じ割合で有機化、脱窒および水稻による吸収が起こり、その後最高分げつ期まで3者の割合が時間とともに直線的に変化し、最高分げつ期から出穂までは穂肥トレーサーと同じ割合になり、出穂以後は次第に実肥トレーサーの配分割合まで変化すると仮定して、有機化した部分以外のトレーサー窒素に対する無機化土壌窒素の利用率を算出した。その結果、第53表に示した65%という利用率が得られた。この値には地下部が含まれてい

ないので、地下部の寄与を含めるならば、トレーサー法によって得られた結果は、前記の無機化土壤窒素の利用率の平均値に極めて近似している。このことは、本研究で得られた無窒素栽培の土壤窒素利用率が、トレーサー窒素の動向から推定される値ともほぼ一致する妥当な値であることを示している。

今回得られた無機化土壤窒素の利用率の値である約70%は、利用率としてしばしば用いられる100%という値に比べて小さいので、その背景について考察する。吉野・出井⁹⁵⁾は100~68%という利用率をポット試験によって得ている。また、無窒素栽培したほ場試験によって、下層土から無機化する窒素を無視した計算では、139~68%という利用率になるという結果を報告している。つまり、彼らは下層土からの窒素供給を無視し得ない条件下では大きな値が得られたのに対して、下層土の寄与が小さい条件では小さい方の値になるとしている⁹⁵⁾。藤井ら⁸⁾は、下層土を考慮に入れずに利用率を計算して52~117%、平均で86%という値を得ている。甲木ら³⁴⁾も無窒素栽培における窒素吸収量の実測値が無機化土壤窒素量の推定値を下回ったと報告している。北田ら³¹⁾は、灰色低地土における土壤無機化窒素利用率として80~60%、グライ土における利用率として100%という値を報告している。

これも下層土を考慮に入れないで計算したものであり、グライ土では下層土の寄与が大きいと考えられるので、下層土を考慮に入れた場合にはグライ土での利用率も100%を下回ることが考えられる。上野ら⁷⁷⁾は、無機化土壌窒素の利用率として、初期は40%、後期は70%という値を使って施肥設計をしているが、この値の根拠については議論していない。これらの報告は、無機化土壌窒素の利用率が100%より低い点で、本研究と同様の結果を示している。

一方、無機化土壌窒素量が水稻の窒素吸収量と一致したとの報告もある。吉野・出井⁹⁵⁾は、無窒素栽培したポット水稻の窒素吸収量が無機化土壌窒素量と量的および时期的にほぼ一致したと報告している。山本ら⁸⁶⁾は、無機化土壌窒素量と無窒素栽培水稻の窒素吸収量との間によい一致をみたと報告している。しかし、山本らはこの一致を得るにあたって下層土を考慮に入れていない。今泉・北村²⁰⁾は、無機化土壌窒素の利用率を100%とした施肥設計モデルを公表している。このモデルでは下層土の寄与を考慮に入れているが、利用率を100%とした根拠については触れていない。このようにしてみると、無機化土壌窒素の利用率を100%とする根拠は必ずしも明確なものではない。

本研究におけるIV-3の結果からも、連作田における無窒素栽培水稻では60～70%の窒素利用率となっている。無機化土壌窒素が水稻によって100%吸収されるためには、脱窒がゼロでなければならないが、このようなことは現実では考えられず、利用率が100%より小さいとする見方の方が正当性がある。

3. 摘要

土壌条件に応じた適切な施肥管理を実施するため、富山県下の水田土壌において、無機化土壌窒素量の推定、無機化量および無機化パターンの年度間の変動、無機化土壌窒素の水稻による利用率などを測定して、土壌窒素の水稻への吸収の実態を明らかにした。

- (1) 25°Cに変換した日数を独立変数として土壌窒素の無機化経過に直線回帰モデルを当てはめて、県下19地点について、各土壌毎のパラメータの値を求めた。
- (2) 無機化土壌窒素量は温度以外の要因によっても年度間で変動するものとみられた。その変動要因を解析した結果、初期無機化量は原土中の無機態窒素量と負の相関を示すことを認めた。春先の降水量の大小が原土中の無機態窒素量を左右する要因の一つであると考え

られた。また、中期以後の窒素無機化速度係数と前年の作況指数との間にも高い負の相関を認めた。

(3)無機化土壌窒素の水稻による利用率の平均値は70%程度で、土壌による有意な差は認められなかった。

VI 水稲の目標窒素吸収量の設定

目標とする良質米コシヒカリの収量を確保しつつ倒伏を防止するためには、各生育時期における最適な窒素吸収量を正確に把握することが不可欠である。既往の研究によって、水稲の窒素栄養と収量構成要素の間には密接な関係があることが明らかにされている(44, 66, 67, 78)。また、前章までに合理的な施肥管理技術を確立するため、施肥窒素と土壌窒素の吸収利用率について検討してきた。そこで、本章ではコシヒカリの窒素吸収量がどの程度であれば多収をあげ、倒伏を防ぐことができるか、年度による傾向も考慮しながら考察し、稲体による窒素吸収量の目標値を定める。

1. 試験研究方法

すでに第35表に示した富山県内の生育観測ほ場において、コシヒカリの時期別の窒素吸収量と収量構成要素の関係について1985年から1987年の3年間の成績に基づいて考察した。なお、生育観測ほ場の施肥は現地の慣行に従っているが、 m^2 当り総窒素施用量はほ場によって異なり、1985年が6.6～21.0g、1986年が10.1～27.5g、1987年が7.8～18.9gとかなり幅があった。また、移植時期は、

1985年が 5月1日～5月10日、1986年が5月2日～5月9日、1987年が5月1日～5月8日であった。富山県農業技術センターほ場における総窒素施用量は3年間とも m^2 当り 12gで、5月7日に移植した。

各調査ほ場において、窒素吸収量は 6月13日、7月3日、幼穂形成期、出穂期、成熟期の5回調査した。1区10株の平均茎数を2連で測定し、その茎数を有する株を、地上部のみ3株抜き取って乾燥後粉碎し、ケルダール分解、水蒸気蒸留法によって全窒素含量を測定した。成熟期に最長稈長、穂数を1区内10株ずつ2地点で調査した。平均穂数を有する3株について着粒数を調べ、1.06の比重選別法によって登熟歩合を測定した。収量は 3.3m^2 の刈り取りを調査水田内それぞれ2地点で行い、精玄米重を秤量することによって求めた。

2. 結果および考察

(1) 気象経過の特徴と水稻の生育

1985年の気象条件は、移植から幼穂形成期頃まで低温寡照気味に、7月下旬から成熟期まで高温多照で経過した。1986年には移植から出穂期までは低温寡照気味であったが、登熟期間の気温は平年並みで、日照はむしろ多めであった。1987年には、期間を通じて気温はほぼ平年

並みに経過したが、5月は寡照、6月から7月中旬までは多照気味で、7月中旬から9月にかけて日照はかなり少なかった。

3年間の生育観測ほ場の水稻の生育経過と収量要素は第54、55、56表に示した。また、年度ごとに比較した各測定値の平均を第57表に示すが、1985年は7月3日の窒素吸収量が少なく、それ以後の時期の吸収量は増加した。最長稈長、穂数、着粒数は少なかったのに対して、登熟歩合が高く、平均収量は 625 g m^{-2} と高かった。また1986年は出穂期以降の窒素吸収量が多く、着粒数も多く、平均収量は 609 g m^{-2} であった。一方、1987年には7月3日の窒素吸収量は多かったが、それ以後の吸収量の増加は少なく、最長稈長、穂数は多かったが、着粒数が十分に確保できなかったため、平均収量は 568 g m^{-2} と3年間で最低であった。

(2) 土壌型別の窒素吸収経過と収量構成要素

土壌型別の水稻の収量構成要素と窒素吸収経過を第58表に示した。黄色土では、幼穂形成期までの窒素吸収量は灰色低地土や黒ボク土と同程度であるが、幼穂形成期から出穂期における吸収量の期間増は少なかった。一方、グライ土では、幼穂形成期までの窒素吸収量は他の土壌

第54表 生育観測ほ場の窒素吸収量の経過と最長稈長・穂数・籾数・収量(1985年)

| 土壌 | ほ場 地点名 | 窒 素 吸 収 量(gm^{-2}) | | | | | 最長稈長 (cm) | 穂数 (本 m^{-2}) | 籾数 ($\times 100\text{m}^{-2}$) | 収量 (gm^{-2}) |
|-------|-----------|-------------------------------|------|------|------|------|--------------|----------------------------|-------------------------------------|----------------------------|
| | | 6.13 | 7.03 | 幼形期* | 出穂期 | 成熟期 | | | | |
| 灰色低地土 | 入善 | 1.24 | 3.40 | 6.18 | 12.6 | 12.9 | 84.4 | 431 | 303 | 656 |
| | 黒部 | 3.10 | 5.75 | 6.80 | 9.7 | 13.5 | 78.0 | 427 | 321 | 628 |
| | 立山 | 2.33 | 2.58 | 6.02 | 8.9 | 13.2 | 85.4 | 302 | 272 | 681 |
| | 富山南 | 1.73 | 3.82 | 4.71 | 9.1 | 8.3 | 83.3 | 335 | 298 | 537 |
| | 婦中 | 2.06 | 5.24 | 4.16 | 7.8 | 11.5 | 85.6 | 439 | 284 | 635 |
| | 農技セ | 1.66 | 3.08 | 5.12 | 7.3 | 8.7 | 80.7 | 344 | 295 | 620 |
| | 高岡 | 1.88 | 3.01 | 4.12 | 7.5 | 11.2 | 86.2 | 423 | 303 | 653 |
| | 砺波 | 2.14 | 4.54 | 6.00 | 9.7 | 12.2 | 88.3 | 400 | 360 | 693 |
| グライ土 | 小矢部 | 1.88 | 3.80 | 3.80 | 9.4 | 13.6 | 84.0 | 413 | 306 | 608 |
| | 富山北 | 1.37 | 2.75 | 4.80 | 10.4 | 11.8 | 88.8 | 340 | 303 | 690 |
| | 小杉 | 1.73 | 4.35 | 6.15 | 9.7 | 14.5 | 84.3 | 402 | 318 | 650 |
| | 福岡 | 3.04 | 5.57 | 7.15 | 10.8 | 12.1 | 86.6 | 372 | 303 | 591 |
| 黄色土 | 氷見 | 2.41 | 3.36 | 4.72 | 8.3 | 12.7 | 83.6 | 403 | 268 | 624 |
| | 大沢野 | 1.36 | 4.83 | 4.45 | 6.9 | 9.7 | 90.0 | 365 | 299 | 547 |
| | 八尾 | 1.07 | 3.77 | 4.60 | 7.1 | 12.0 | 86.8 | 414 | 266 | 595 |
| | 井波 | 3.40 | 4.40 | 5.65 | 10.2 | 13.5 | 89.5 | 414 | 361 | 660 |
| 黒ボク土 | 魚津 | 2.13 | 3.22 | 4.45 | 8.3 | 13.5 | 78.1 | 376 | 309 | 616 |
| | 上市 | 2.08 | 4.16 | 7.35 | 7.1 | 10.9 | 78.5 | 386 | 250 | 541 |
| | 福光 | 2.13 | 3.64 | 5.40 | 11.4 | 12.5 | 82.2 | 423 | 299 | 654 |

*: 幼穂形成期

第55表

生育観測ほ場の窒素吸収量の経過と最長稈長・穂数・籾数・収量(1986年)

| ほ場 地点名 | 窒 素 吸 収 量 (gm^{-2}) | | | | | | 最長稈長 (cm) | 穂数 (本 m^{-2})($\times 100\text{m}^{-2}$) | 籾数 ($\times 100\text{m}^{-2}$) | 収量 (gm^{-2}) |
|-----------|--------------------------------|------|------|------|------|------|--------------|---|-------------------------------------|----------------------------|
| | 6.13 | 6.23 | 7.03 | 幼形期* | 出穂期 | 成熟期 | | | | |
| 入善 | 0.83 | 1.86 | 4.16 | 6.57 | 11.1 | 15.5 | 91.1 | 431 | 355 | 715 |
| 黒部 | 1.79 | 4.91 | 4.77 | 6.20 | 9.5 | 15.8 | 81.9 | 446 | 287 | 595 |
| 立山 | 1.29 | 2.95 | 3.86 | 6.10 | 9.0 | 11.8 | 80.2 | 382 | 326 | 572 |
| 富山南 | 2.06 | 3.89 | 4.72 | 5.60 | 7.9 | - | 86.6 | 374 | 372 | 593 |
| 婦中 | 1.75 | 2.18 | 3.98 | 4.00 | 5.9 | 9.8 | 84.4 | 380 | 269 | 546 |
| 農技セ | 1.61 | 3.60 | 4.37 | 5.24 | 9.4 | 12.2 | 80.0 | 390 | 319 | 616 |
| 高岡 | 1.28 | 4.41 | 6.18 | 7.20 | 9.7 | 14.9 | 94.6 | 498 | 385 | 649 |
| 砺波 | 1.61 | 3.48 | 4.90 | 6.00 | 10.9 | 13.3 | 95.4 | 494 | 392 | 627 |
| 小矢部 | 1.32 | 2.58 | 4.16 | 6.30 | 10.5 | 14.7 | 90.9 | 442 | 377 | 663 |
| 富山北 | 1.15 | 2.67 | 4.04 | 4.95 | 8.8 | | 85.3 | 374 | 304 | 574 |
| 小杉 | 0.97 | 2.38 | 3.36 | 5.20 | 10.3 | 13.9 | 95.8 | 391 | 315 | 650 |
| 福岡 | 1.47 | 2.59 | 3.29 | 4.25 | 7.8 | 11.4 | 85.8 | 379 | 302 | 622 |
| 氷見 | 1.10 | 3.09 | 3.69 | 5.15 | 10.0 | 14.0 | 89.5 | 423 | 322 | 625 |
| 大沢野 | 0.92 | 2.76 | 4.38 | 6.00 | 8.6 | 13.3 | 93.3 | 364 | 322 | 525 |
| 八尾 | 1.42 | 3.81 | 3.83 | 5.05 | 8.1 | 12.0 | 92.6 | 432 | 286 | 583 |
| 井波 | 2.07 | 3.52 | 4.67 | 7.25 | 10.9 | 15.7 | 93.9 | 463 | 363 | 587 |
| 魚津 | 1.31 | 3.18 | 5.04 | 6.00 | 10.3 | | 88.2 | 426 | 333 | 597 |
| 上市 | 0.93 | 2.02 | 2.34 | 5.00 | 12.1 | 12.1 | 90.6 | 367 | 274 | 545 |
| 福光 | 1.66 | 3.48 | 5.28 | 6.15 | 9.8 | 12.4 | 88.5 | 401 | 318 | 608 |

*:幼穂形成期

第56表

生育観測ほ場の窒素吸収量の経過と最長稈長・穂数・籾数・収量(1987年)

| ほ場 地点名 | 窒 素 吸 収 量 (gm^{-2}) | | | | | | 最長稈長 (cm) | 穂数 (本 m^{-2}) | 籾数 ($\times 100\text{m}^{-2}$) | 収量 (gm^{-2}) |
|-----------|--------------------------------|------|------|------|------|------|--------------|----------------------------|-------------------------------------|----------------------------|
| | 6.13 | 6.23 | 7.03 | 幼形期* | 出穂期 | 成熟期 | | | | |
| 入善 | 1.58 | 2.84 | 5.28 | 5.37 | 9.8 | 12.6 | 91.1 | 407 | 318 | 641 |
| 黒部 | 2.42 | 5.06 | 4.45 | 5.60 | 8.6 | 15.3 | 81.9 | 402 | 307 | 578 |
| 立山 | 1.59 | 3.74 | 3.76 | 5.24 | 7.1 | 13.5 | 80.2 | 366 | 277 | 575 |
| 富山南 | 2.24 | 4.72 | 6.34 | 7.75 | 7.6 | 11.3 | 86.6 | 410 | 312 | 563 |
| 婦中 | 1.83 | 2.97 | 3.83 | 4.53 | 6.0 | 11.4 | 84.4 | 368 | 264 | 537 |
| 農技セ | 1.79 | 3.50 | 4.00 | 4.24 | 7.1 | 10.5 | 80.0 | 406 | 326 | 577 |
| 高岡 | 1.90 | 3.52 | 4.24 | 3.75 | 8.3 | 9.4 | 94.6 | 496 | 315 | 547 |
| 砺波 | 2.11 | 4.62 | 4.83 | 5.65 | 9.5 | | 95.4 | 435 | 329 | 628 |
| 小矢部 | 3.09 | 5.36 | 7.31 | 6.55 | 10.3 | 12.5 | 90.9 | 451 | 358 | 662 |
| 富山北 | 1.19 | 3.01 | 3.24 | 4.31 | 8.0 | 8.6 | 85.3 | 360 | 323 | 475 |
| 小杉 | 1.05 | 3.42 | 4.13 | 5.15 | 9.8 | 12.9 | 95.8 | 435 | 338 | 613 |
| 福岡 | 2.00 | 4.21 | 3.99 | 3.70 | 8.7 | 9.1 | 85.8 | 412 | 326 | 585 |
| 氷見 | 1.15 | 3.96 | 3.89 | 4.50 | | 13.1 | 89.5 | 400 | 279 | 547 |
| 大沢野 | 1.66 | 3.39 | 5.61 | 5.62 | 8.4 | 11.4 | 93.3 | 423 | 339 | 478 |
| 八尾 | 1.42 | 2.51 | 4.44 | 5.20 | 5.6 | 10.4 | 92.6 | 394 | 235 | 510 |
| 井波 | 2.68 | 4.43 | 5.21 | 6.05 | 7.4 | 12.4 | 93.9 | 400 | 319 | 533 |
| 魚津 | 3.27 | 5.54 | 5.94 | 6.53 | | 11.9 | 88.2 | 486 | 298 | 561 |
| 上市 | 1.56 | 2.96 | 3.64 | 4.33 | 7.2 | 11.0 | 90.6 | 389 | 302 | 537 |
| 福光 | 2.44 | 4.16 | 4.32 | 4.45 | 10.8 | 14.2 | 88.5 | 500 | 316 | 584 |

*: 幼穂形成期

第57表 水稻生育観測ほ場の窒素吸収量と生育の年度別平均値

| 年度 | 水 稻 の 窒 素 吸 収 量(gm^{-2}) | | | | | | 稈 長 (cm) | 穂 数 (本 m^{-2}) | 着粒 数 ($\times 100\text{m}^{-2}$) | 登熟 歩合 (%) | 収 量 (gm^{-2}) |
|------|-------------------------------------|------|------|------|------|------|----------------|--------------------------------|--|-----------------|--------------------------------|
| | 6/13 | 6/23 | 7/ 3 | 7/13 | 出穂 | 成熟 | | | | | |
| 1987 | 2.0 | 3.9 | 4.7 | 5.3 | 8.3 | 11.8 | 87.9 | 419 | 309 | 81.8 | 568 |
| 1986 | 1.9 | 3.1 | 4.3 | 4.9 | 11.0 | 13.3 | 89.9 | 415 | 328 | 86.7 | 609 |
| 1985 | 2.2 | 3.8 | 4.0 | 5.0 | 9.2 | 12.2 | 84.5 | 393 | 301 | 88.4 | 625 |

第58表 土壌別収量構成と窒素吸収経過(1985~1987年)

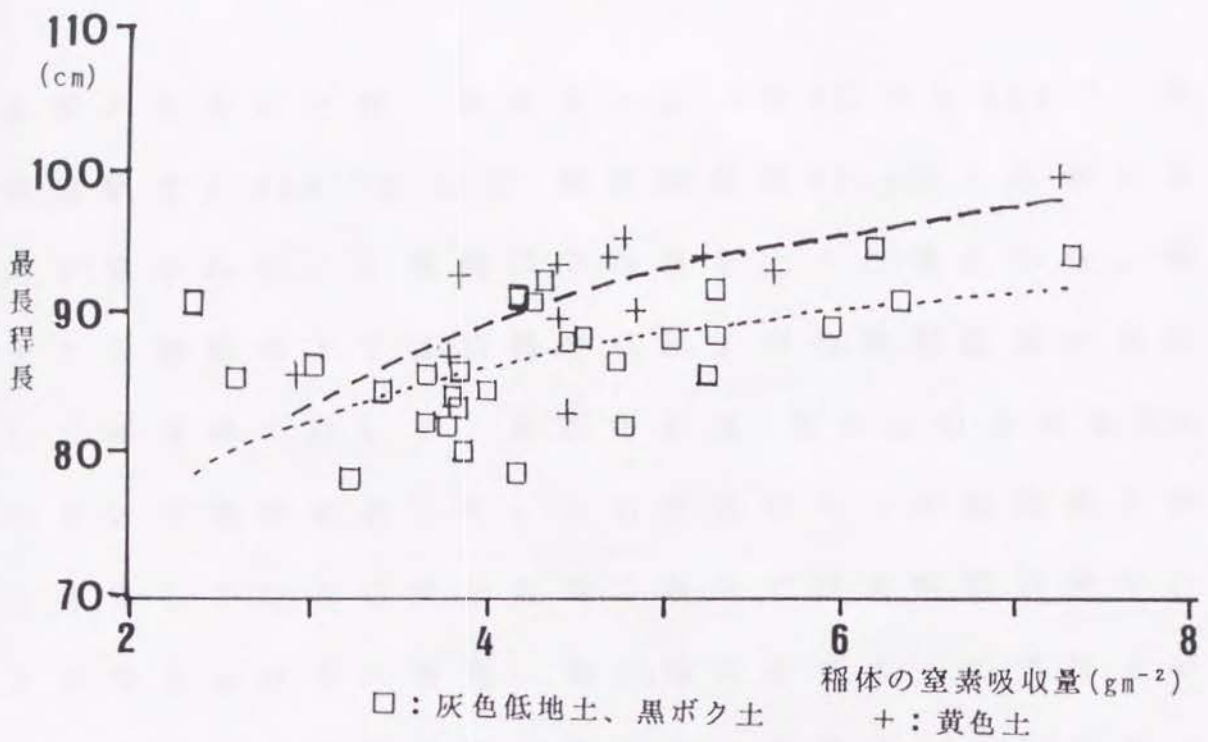
| 土壌条件 (調査点数) | 収 量 (g) | 穂 数 (本) | 着 粒 数 ($\times 100$ 粒) | 最 長 稈 長(cm) | 窒 素 吸 収 量 (g) | | | | | (㎡当り) | |
|----------------|---------------|---------------|----------------------------------|----------------------|---------------|------|------|------|-------|---------------------------|-------------------------|
| | | | | | | | | | | 幼形期*1 N吸収 量当り 穂数 | 出穂期 N吸収 量当り 粒数 |
| | | | | | 6/13 | 7/ 3 | 幼形*1 | 出穂 | 成熟 | | |
| 灰色低地土 (24) | 616 | 414 | 320 | 87.9 | 1.88 | 4.54 | 5.59 | 9.01 | 12.73 | 74.1 | 3551 |
| グライ土 (12) | 604 | 391 | 308 | 87.5 | 1.55 | 3.81 | 4.81 | 9.30 | 12.21 | 81.3 | 3312 |
| 黄色土 (9) | 558 | 408 | 310 | 90.5 | 1.77 | 4.57 | 5.54 | 8.12 | 12.33 | 73.6 | 3818 |
| 黒ボク土 (9) | 583 | 417 | 300 | 86.8 | 1.94 | 4.18 | 5.29 | 8.93 | 12.31 | 78.8 | 3359 |

*1:幼穂形成期

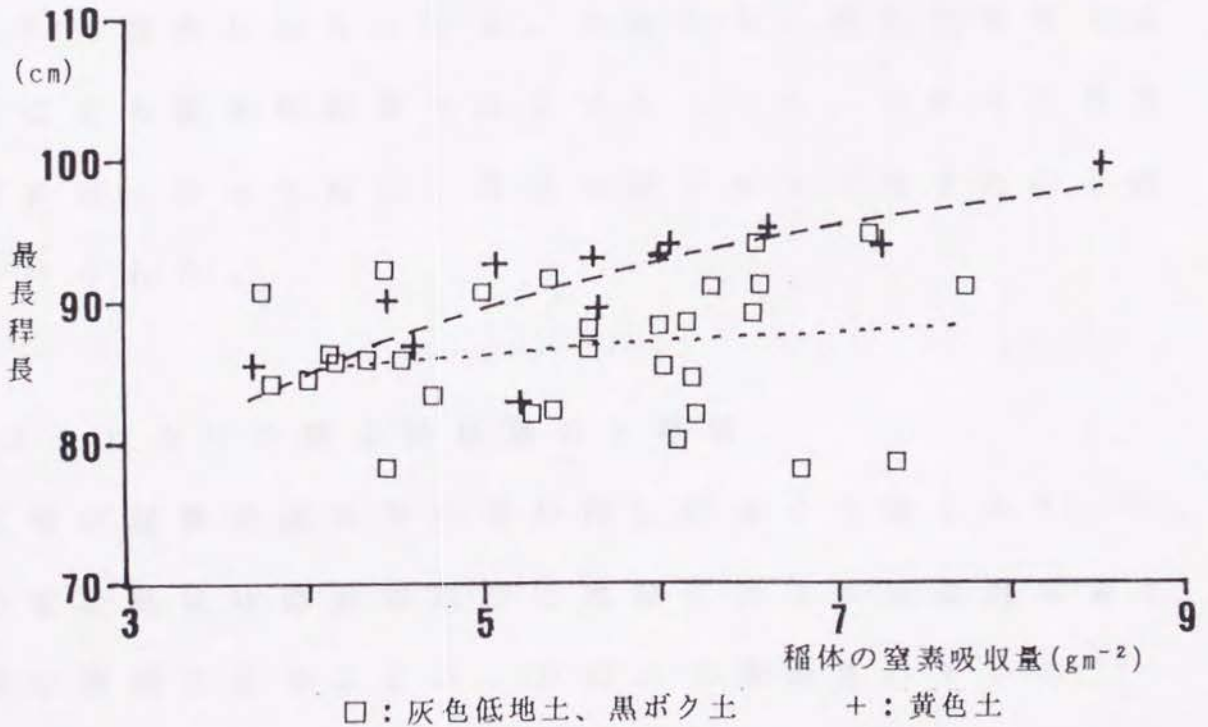
型に比べて少なかったが、出穂期を過ぎた頃から多くなった。また、穂数は少なかったが、着粒数は灰色低地土に次いで高かった。グライ土での窒素吸収量が生育の前半に少なく、後半に多いという傾向は、北田³¹⁾が示した石川県の類似土壌におけるコシヒカリの窒素吸収パターンと近似していた。土壌型別の平均値では、以上のような傾向が見られたのに対して、一定量以上の穂数や着粒数が確保できた地点だけを抜き出して比較すると、土壌型による違いは認められなかった。また、収量の低い地点では、土壌型に関係なく幼穂形成期から出穂期にかけての窒素吸収量が少なかった。このことから、目標とする窒素吸収量は土壌型に関係なく一定であると考えた。

(3) 窒素吸収量と最長稈長との関係

第20図および第21図に示すように、7月3日並びに幼穂形成期の窒素吸収量と最長稈長との間に正の相関関係が認められた。そのことから推察すると、窒素吸収量が7月3日で 5.5 g m^{-2} 以上、幼穂形成期で 6.5 g m^{-2} 以上になると最長稈長が90cm以上に伸びるおそれ大きい。一般に、コシヒカリの倒伏を防止するためには稈長を90cm以下に抑制するのが良いと言われている⁴²⁾。そこで、第59表にまとめたようにこれらの値を窒素吸収量の上限値とす



第 2 0 図 7 月 3 日の窒素吸収量と最長稈長



第 2 1 図 幼穂形成期の窒素吸収量と最長稈長

る必要がある。一方、黄色土では 7月3日で 3.8 g m^{-2} 、幼穂形成期で 5.4 g m^{-2} 以上で 最長稈長が 90 cm以上に伸びる傾向が見られた。土壌別に平均値を比べた場合でも、黄色土と灰色低地土では幼穂形成期までの吸収経過がほぼ同じであるのに対して、最長稈長は黄色土の方が 2.6 cm長いという特徴を示した。この原因の一つには黄色土が多く分布している山間丘陵地において日照時間が少ないことが考えられる。事実、第22図に示すように黄色土地帯の大沢野や八尾のほ場に最も近い八尾の AMeDASのデータをみると、7月、8月の日照時間の合計は3年間の平均で、灰色低地土が分布する富山の AMeDASの 70%、泊の AMeDASの 57%程度しかなかった。また、同じ黄色土の井波のほ場に近い福光の AMeDASの日照時間でも、富山の 88%、泊の 73%程度しかなかった。すなわち、黄色土地帯では水稻による窒素吸収量が同じであっても、地形的に日照時間が短くなるために、稈長が伸びやすくなるものと結論づけられた。

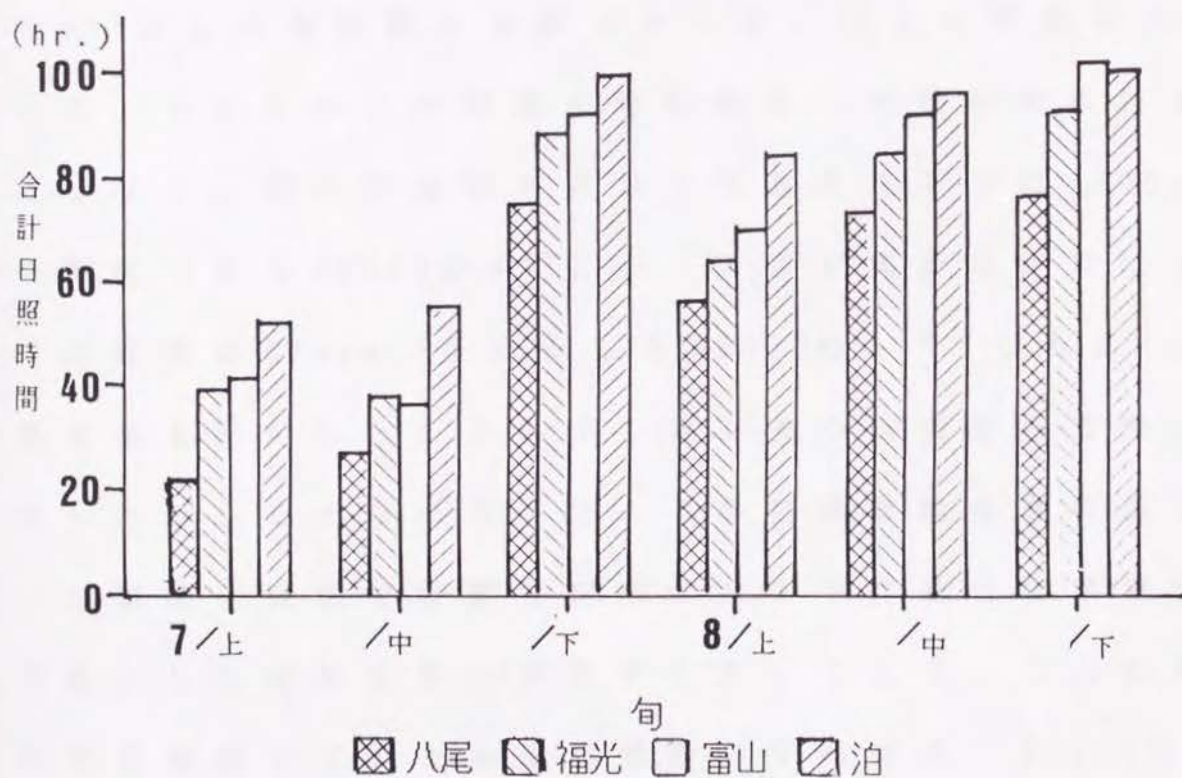
(4) コシヒカリの窒素吸収量の目標値

水稻の収量が面積当り着粒数に大きく支配され^{39, 46)}、その着粒数は幼穂形成期や出穂期における窒素吸収量と密接な関係にあることが、以前から指摘されている⁴⁴⁾。

第 5 9 表 窒素吸収量の上限値

(gm^{-2})

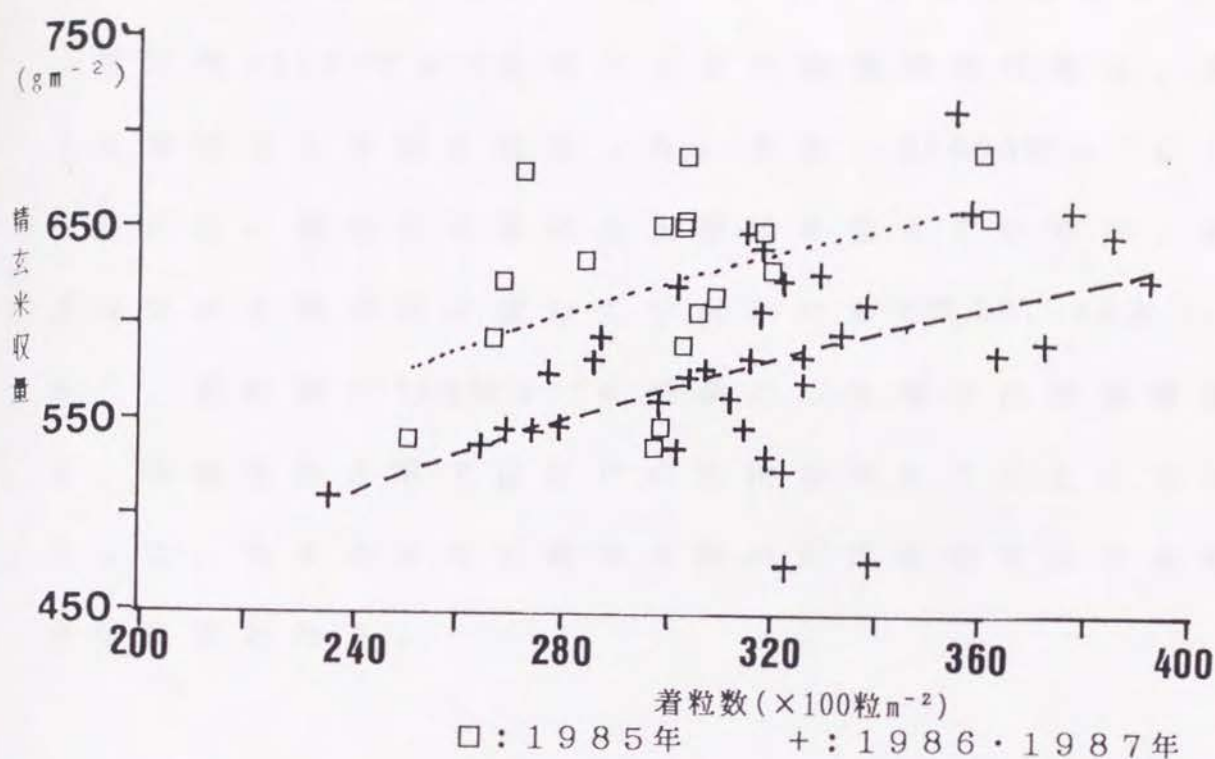
| 土壌条件 | 7 月 3 日 | 幼穂形成期 |
|---------------|---------|-------|
| 灰色低地土 黒ボク土 | 5.5 | 6.5 |
| 黄色土 | 3.8 | 5.4 |



第 2 2 図 旬別日照時間の比較

67)。そこで窒素吸収量の目標値を設定するために、まず目標とする収量を実現できる着粒数を決定し、次にその着粒数を確保できる窒素吸収量を求める手順で考察を行った。

第23図に単位面積当り着粒数と収量の関係を示してある。両者の間には正の相関関係が認められ、登熟期間の天候が良好であった1985年には 31000 粒 m^{-2} で、平均 630 g m^{-2} 以上の収量が得られた。一方、1986年、1987年のように平年並みかまたは、やや低温・寡照気味の気象経過を示す年では、 600 g m^{-2} 以上の高収量を上げるには 33500 粒 m^{-2} 以上の着粒数が必要であった。以上の関係に基づいて、コシヒカリの収量と着粒数を、天候がそれほど良好でなく、倒伏の危険が伴う気象条件下では 600 g m^{-2} を確保できる 33500 粒 m^{-2} とし、天候が良好な年にはさらに高収量の 650 g m^{-2} を目指した 35000 粒 m^{-2} とした2つの目標水準を設定した。さらに、第35表の調査地点で慣行施肥したコシヒカリにおいて、この目標着粒水準に達していた稲体の窒素吸収量を求め、その平均値を目標窒素吸収量とした結果を第60表に示した。ここで、この目標着粒数を確保していた水稻の穂数の平均値は、 35000 粒 m^{-2} が 440 本 m^{-2} 、 33500 粒 m^{-2} の場合は 412 本 m^{-2} であった。なお、着粒数 33500 粒 m^{-2} 、穂数 412 本 m^{-2} は富山県の600



第23図 着粒数と精玄米収量の関係

第60表 コシヒカリの目標窒素吸収量

| 目標収量 (g) | 穂数 (本) | 着粒数 ($\times 100 \text{粒}$) | (m ² 当り) | | | | |
|-------------|-----------|----------------------------------|---------------------|-----|-----|------|------|
| | | | 目標窒素吸収量 (g) | | | | |
| | | | 6/13 | 7/3 | 幼形期 | 出穂期 | 成熟期 |
| 650 | 440 | 350以上 | 2.0 | 4.1 | 6.4 | 10.1 | 13.9 |
| 600 | 412 | 320~350 | 1.6 | 3.9 | 5.3 | 8.9 | 11.6 |

g m^{-2} を目指した水稻栽培指針⁷⁶⁾の目標着粒数 33300 粒 m^{-2} と目標穂数 410本 m^{-2} とかなり一致した値である。

着粒数 33500粒 m^{-2} に相当する目標窒素吸収量は、黄色土における上限値に近かった。また、35000粒 m^{-2} 以上の場合には、黄色土における上限値を越えているが、他の土壌型の上限値には達していなかった(第59、60表)。しかし、着粒数 35000粒 m^{-2} を目標とした場合の窒素吸収量は、気象条件次第では倒伏の危険が伴なうことになる。従って、気象のより正確な予測が目標値設定のための重要な要素となる。

3. 摘要

水稻コシヒカリの収量と着粒数を、天候がそれほど良好でなく、倒伏の危険が伴なう気象条件下では 600g m^{-2} を確保できる 33500粒 m^{-2} と、天候が良好な年にはさらに高収量の 650g m^{-2} を目指した 35000粒 m^{-2} の2つの目標水準を設定し、この着粒数を得るために必要な窒素吸収量の目標値を策定した。

その結果、33500粒 m^{-2} を確保するための窒素吸収量は、7月3日頃では 3.9g m^{-2} 、幼穂形成期では 5.3g m^{-2} 、出穂期では 8.9g m^{-2} 、成熟期では 11.6g m^{-2} であった。35000粒 m^{-2} を確保するためには、7月3日頃では 4.1g m^{-2} 、幼穂

形成期では 6.4 g m^{-2} 、出穂期では 10.1 g m^{-2} 、成熟期では 13.9 g m^{-2} が目標値となった。

窒素吸収量が7月3日で 5.5 g m^{-2} 、幼穂形成期で 6.5 g m^{-2} 以上になると、最長稈長が90cm以上に伸びるおそれ大きい。従って、倒伏を防止するためこれらの値を上限値と設定した。一方、黄色土では稈長が伸びやすいため、7月3日の吸収量で 3.8 g m^{-2} 、幼穂形成期で 5.4 g m^{-2} を上限値と設定した。

VII 研究結果の検証と施肥技術への応用

前章まで、中粗粒質灰色低地土において、水稻コシヒカリを栽培した場合の土壌と稲体間の土壌窒素および各種施肥窒素の動態について考察してきた。本章では、得られた研究結果の妥当性を検証するとともに、施肥技術への応用例を示して本研究の結論とする。

1. 各種ほ場でのコシヒカリによる窒素吸収量の推定値の妥当性

本研究で得た土壌窒素の無機化と利用率および施肥窒素の利用率に関する結果が妥当であるかを、以下の手順で求めた推定値をほ場試験で実測した値を比較し、両者の値の整合程度から検証する。

まず、土壌由来窒素の推定吸収量は第V章の結果に基づき、施肥由来窒素の推定吸収量は第61表に示した各ほ場の施肥量と第II章で求めた施肥窒素利用率を乗じてそれぞれ算出した。次に、これらの推定値を加えて現地における水稻の窒素吸収量の推定値とした。また、計算に際しては、再有機化される無機化土壌窒素の一部が施肥窒素で代替されるプライミング効果も考慮に入れ⁸²⁾、

第61表 現地における水稻への施肥量

(gm^{-2})

| 施肥時期 | | 灰 色 低 地 土 | | | | | | | | | 全 | | | |
|------|--|-----------|------|------|------|------|-------|------|------|---------|------|------|------|------|
| | | 高岡 | 黒部 | 小矢部 | 入善 | 農試 | 婦中 | 富山南 | 立山 | 砺波 | 平均 | 平均 | | |
| 基 肥 | | 3.4 | 4.3 | 1.8 | 3.4 | 4.0 | 3.6 | 4.2 | 3.0 | 2.9 | 3.4 | 3.2 | | |
| 早期追肥 | | 1.4 | 4.1 | 2.4 | 3.7 | 2.0 | 1.4 | 2.2 | 2.5 | 2.6 | 2.5 | 2.2 | | |
| 中間追肥 | | 0.5 | 0.9 | 0.3 | 1.3 | 1.0 | 0.9 | 0.1 | 0.2 | 0.5 | 0.5 | 0.4 | | |
| 穂 肥 | | 3.1 | 3.6 | 4.7 | 4.3 | 4.0 | 2.3 | 3.0 | 3.5 | 2.6 | 3.5 | 3.2 | | |
| 実 肥 | | 3.4 | 7.5 | 4.5 | 5.5 | 2.0 | 1.5 | 2.8 | 4.4 | 2.5 | 3.8 | 3.7 | | |
| 合 計 | | 11.8 | 20.4 | 13.7 | 16.8 | 12.0 | 9.5 | 12.2 | 13.5 | 11.0 | 13.4 | 12.6 | | |
| | | グ ラ イ 土 | | | | | 黄 色 土 | | | 黒 ボ ク 土 | | | | |
| | | 小杉 | 氷見 | 富山北 | 福岡 | 平均 | 井波 | 大沢野 | 八尾 | 平均 | 魚津 | 上市 | 福光 | 平均 |
| 基 肥 | | 3.5 | 2.6 | 3.0 | 1.0 | 2.5 | 2.5 | 3.6 | 3.0 | 3.0 | 3.7 | 4.9 | 3.4 | 4.0 |
| 早期追肥 | | 2.0 | 1.6 | 3.0 | 1.5 | 2.0 | 2.3 | 1.1 | 2.2 | 1.8 | 3.2 | 1.5 | 1.5 | 2.1 |
| 中間追肥 | | 0.0 | 0.2 | 0.5 | 0.0 | 0.2 | 0.4 | 0.5 | 0.0 | 0.3 | 0.2 | 0.6 | 0.1 | 0.3 |
| 穂 肥 | | 3.6 | 3.2 | 3.0 | 3.4 | 3.3 | 2.8 | 1.9 | 1.8 | 2.2 | 2.7 | 2.8 | 4.3 | 3.3 |
| 実 肥 | | 4.1 | 2.7 | 3.2 | 3.3 | 3.3 | 4.0 | 2.1 | 3.8 | 3.3 | 5.5 | 4.2 | 3.4 | 4.3 |
| 合 計 | | 13.2 | 10.3 | 12.7 | 9.1 | 11.4 | 11.8 | 9.2 | 10.8 | 10.6 | 15.2 | 13.9 | 12.6 | 13.9 |

1985～89年の富山県生育観測ほ場の調査データの平年値

第Ⅳ章の結果を用いて有機化率を求めた。その結果第62表に示す通り各ほ場の水稻による窒素吸収量推定値の平均は 12.53 g m^{-2} で、実測値の平均である 11.71 g m^{-2} と比較的よく一致し、推定が正しいことを示している。また、推定結果には土壌の特性の違いも反映されている。すなわち、中粗粒質土壌では土壌からの窒素供給量が少ない場合が多く、黒部や入善のほ場で前吸収窒素に占める土壌由来窒素の割合は50%程度にとどまり、小山³⁶⁾の示した68%という値に比べて小さくなっている。これに対して、窒素供給量の大きい土壌においては土壌由来窒素が占める割合は70%を越えるという推定結果が得られた。

水稻の全窒素吸収量に占める施肥由来窒素の割合はこのような変異を示したが、全窒素吸収量はほぼ一定の水準に達していた。このことは、各土壌の窒素供給力に応じて必要な窒素を施肥する技術がおおむね実現されていることを示している。しかし、一部ほ場で推定値と実測値の間にやや開きがあったり(第62表)、推定値の年度間における変動の傾向と実測値の変動傾向との間に多少の食い違いがみられた(第63表)。その原因は土壌および施肥窒素の利用率を一律に当てはめたり、測定上の誤差などによるものと考えられる。

以上、水稻に吸収された各形態の窒素量を計算によっ

第62表 水稻の窒素吸収量の推定および現地ほ場に生育した水稻の窒素吸収実測値との比較

| 項目 | 灰 色 低 地 土 | | | | | | | | | | 全体 平均 |
|---|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|
| | 高岡 | 黒部 | 小矢部 | 入善 | 農セ | 婦中 | 富山南 | 立山 | 砺波 | 平均 | |
| 作土深(cm)×比重 | 12.0 | 17.7 | 15.0 | 20.2 | 17.0 | 14.1 | 18.2 | 15.3 | 15.0 | 16.1 | 15.2 |
| 作土無機化量(mgkg ⁻¹) | 50.0 | 33.7 | 47.2 | 34.3 | 40.8 | 60.4 | 51.1 | 49.5 | 41.4 | 45.4 | 53.8 |
| 原土NH ₄ -N(mgkg ⁻¹) | 6.4 | 2.6 | 3.9 | 3.2 | 2.8 | 5.2 | 2.4 | 6.5 | 7.7 | 4.5 | 5.1 |
| 下層土無機化量 ^{*1} | 9.0 | 8.6 | 10.2 | 10.1 | 9.9 | 12.3 | 13.0 | 11.4 | 9.8 | 10.7 | 11.9 |
| プライミング効果(gm ⁻²) ^{*2} | 2.05 | 3.02 | 1.87 | 2.72 | 2.14 | 1.93 | 2.15 | 2.05 | 1.76 | 2.19 | 2.05 |
| 施肥窒素吸収量 ^{*3} | 4.38 | 6.86 | 5.33 | 6.36 | 4.37 | 3.32 | 4.17 | 4.85 | 3.62 | 4.81 | 4.51 |
| 窒素吸収量推定値 ^{*4} | 10.76 | 13.63 | 12.26 | 13.79 | 11.29 | 11.47 | 12.82 | 12.56 | 10.26 | 12.10 | 12.53 |
| 窒素吸収量実測値 ^{*5} | 11.83 | 13.53 | 12.63 | 12.98 | 10.48 | 10.43 | 10.08 | 12.14 | 12.60 | 11.86 | 11.71 |

| | グ ラ イ 土 | | | | | 黄 色 土 | | | | 黒 ボ ク 土 | | | |
|-----------------------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|-------|-------|-------|
| | 小杉 | 氷見 | 富山北 | 福岡 | 平均 | 井波 | 大沢野 | 八尾 | 平均 | 魚津 | 上市 | 福光 | 平均 |
| 作土深×比重 | 12.8 | 15.0 | 12.8 | 16.5 | 14.3 | 15.0 | 14.1 | 16.9 | 15.3 | 13.9 | 14.9 | 13.1 | 14.0 |
| 作土無機化量 | 58.1 | 38.7 | 50.5 | 79.2 | 56.6 | 39.2 | 79.1 | 48.4 | 55.6 | 54.1 | 50.2 | 72.1 | 58.8 |
| 原土中NH ₄ -N | 7.1 | 5.6 | 3.1 | 5.3 | 5.3 | 7.4 | 6.9 | 6.4 | 6.9 | 3.5 | 3.5 | 7.0 | 4.7 |
| 下層土窒素量 | 11.1 | 8.9 | 9.1 | 18.6 | 11.8 | 9.3 | 16.2 | 12.3 | 12.8 | 10.7 | 10.7 | 13.8 | 11.9 |
| プライミング効果 | 2.13 | 1.69 | 1.95 | 1.20 | 1.74 | 1.77 | 1.80 | 1.68 | 1.75 | 2.27 | 2.58 | 2.13 | 2.33 |
| 施肥N吸収量 | 4.86 | 3.87 | 4.23 | 3.69 | 4.16 | 4.18 | 3.17 | 3.55 | 3.63 | 5.06 | 4.91 | 4.92 | 4.96 |
| 窒素吸収量 (推定値) | 12.47 | 9.92 | 10.62 | 14.86 | 11.97 | 10.54 | 13.38 | 11.55 | 11.82 | 12.50 | 12.56 | 14.04 | 13.03 |
| 窒素吸収量 (実測値) | 10.91 | 13.34 | 11.98 | 10.97 | 11.80 | 13.08 | 12.04 | 9.90 | 11.67 | 10.71 | 11.54 | 11.60 | 11.28 |

*1:下層土の無機化窒素量(mgkg⁻¹)は(作土+原土中NH₄-N)の40%、下層土の量は(作土+原土中NH₄-N)×作土深×比重の1/3とした。水稻への利用率は作土と同じとした。

*2:プライミング効果=施肥窒素有機化量とした。基肥、早期追肥、中間追肥、穂肥、実肥窒素の有機化率を32%、3%、25%、15%、10%とした。

*3:施肥窒素吸収量(gm⁻²)は基肥、早期追肥、中間追肥、穂肥、実肥窒素の水稻への利用率を26%、6%、32%、60%、40.5%とした。

*4:窒素吸収量推定値(gm⁻²)=施肥窒素吸収量+(プライミング効果+(作土の無機化窒素量+原土中NH₄-N)×作土深×比重+下層土の無機化窒素量)×土壌窒素の利用率
土壌窒素吸収量とプライミング効果を含む無機化土壌窒素の利用率を69%/1.05とした。(1.05は地上部を対象とするための係数)

*5:窒素吸収量実測値(gm⁻²)は1985～89年の富山県生育観測ほ場の調査データの平均値

第63表 灰色低地土における窒素吸収量の
年度別推定値と実測値との比較

| 年度 | 無機化 窒素量 (mgkg^{-1} 乾土) | プライミング 効果 (gm^{-2}) | 原土中 $\text{NH}_4\text{-N}$ (mgkg^{-1} 乾土) | 土壌窒素 吸収量 (gm^{-2}) | 施肥窒素 吸収量 (gm^{-2}) | 推定 吸収量 (gm^{-2}) | 実測 吸収量 (gm^{-2}) |
|------|--|--------------------------------------|---|-------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| 1989 | 55.3 | 1.84 | 1.2 | 7.45 | 4.25 | 11.70 | 11.30 |
| 1988 | 49.3 | 1.99 | 1.4 | 6.90 | 4.08 | 10.98 | 11.10 |
| 1987 | 50.9 | 2.26 | 13.2 | 8.56 | 4.91 | 13.47 | 12.00 |
| 1986 | 39.4 | 2.41 | 3.8 | 6.35 | 5.28 | 11.63 | 13.50 |
| 1985 | 42.8 | 2.50 | 2.0 | 6.58 | 5.61 | 12.20 | 11.80 |
| 平均 | 4.75 | 2.20 | 0.43 | 7.17 | 4.83 | 11.99 | 11.94 |

作土深差15cm、仮比重1とした他は第62表と同じ条件を仮定して計算した。
 窒素無機化量と原土中 $\text{NH}_4\text{-N}$: mgkg^{-1} 乾土
 プライミング効果と窒素吸収量 : gm^{-2}

第64表 基肥無施用、早期追肥施用水稲の窒素
吸収量の推定値と目標窒素吸収量

| (gm^{-2}) | | | |
|----------------------|-----|------|-------|
| 年度 | ほ場 | 7月3日 | 幼穂形成期 |
| 1989 | 復帰田 | 3.34 | 4.39 |
| | 連作田 | 3.38 | 3.87 |
| 目標窒素吸収量 | | 3.90 | 5.30 |

ほ場は第IV章参照、幼穂形成期の吸収量は7月23日
 の吸収量から推定した。
 基肥由来窒素量は1989年復帰田 0.562gm^{-2} 、連作田
 0.824gm^{-2} 、早期追肥窒素量は 2gm^{-2} 施用。

て求める手順は、この方法でおおむね妥当であると考えられた。しかしながら、施肥方法を一層高度化するためには、本研究で明らかにした窒素の利用率や無機化量の年度間の変動などを考慮に入れる必要がある。

2. 研究結果を技術へ反映する例としての復帰田での施肥設計

前述のような条件の違いによる窒素の利用率や無機化量の変動を施肥技術に反映させる例の一つとして、復帰田における施肥に関して以下考察する。

(1) 基肥

生育状況を見て施用を制御できる追肥と異なり、基肥は移植時には前もって施用しなければならない。また、復帰田では特に基肥窒素施用量の決定が問題になっている。そこで、適正な基肥窒素量について、本研究の結果に基づいて試算した。

第64表は、富山県農業技術センターほ場の復帰田と連作田において施肥区の水稲窒素吸収量の実測値から基肥由来の窒素吸収量を差引いて、基肥無施用の場合の水稲による窒素吸収量を推定したものである。幼穂形成期ま

での復帰田における水稻の窒素吸収量は連作田よりは多いが、 33500 粒 m^{-2} の着粒を確保するために必要な目標吸収量と比較すると、 $0.6 \sim 0.9 \text{ g m}^{-2}$ 程度不足している。復帰田に施用した基肥窒素の利用率は平均で32.1%であった。従って、窒素吸収量の不足を補うには $2 \sim 3 \text{ g m}^{-2}$ ($2 \times 0.32 = 0.64 \text{ g m}^{-2}$)程度の基肥窒素が必要である。

(2) 穂肥

復帰田では穂肥窒素の利用率が連作田より10%程度高まり、土壌由来の窒素吸収量も増加するという本研究で得られたこれらの結果に基づいて、富山県農業技術センターほ場の復帰田において基肥および早期追肥としてそれぞれ窒素成分で 2 g m^{-2} 施用した条件で、穂肥時期の窒素吸収量の変化を試算した。

幼穂形成期における水稻の全窒素吸収量は、復帰田が 4.96 g m^{-2} 、連作田が 4.69 g m^{-2} であり、いずれも第VI章で求めた目標窒素吸収量よりやや低い値であった。穂肥を出穂18日前と10日前の2回、連作田と同量に窒素 2 g m^{-2} をそれぞれ施用した場合、幼穂形成期から出穂期にかけての復帰田での水稻の窒素吸収量は、連作田に比べて 2 g m^{-2} 程度多かった。出穂期における水稻による全窒素吸収量は復帰田が 10.85 g m^{-2} 、連作田が 8.39 g m^{-2} で、復

帰田では目標窒素吸収量より多かった。従って、復帰田では生育後半の吸収量が過剰になる危険性が高い（第65表）。富山県の慣行では、復帰田では基肥を減らすことになってはいるものの、追肥については必ずしも減量することになっていない。しかし、生育状況や気象経過も加味する必要はあるが、幼穂形成期における水稻の窒素吸収量の値によっては、追肥量をかなり減量する必要がある。

（3）施肥設計の実例

田畑輪換を長期間繰り返した礫質灰色低地土の復帰田での施肥設計に関して考察する。

第66表は1982年より水稻-大麦-大豆-大麦-大豆の3年5作体系を繰返してきたほ場において、1991年に作付した復帰田での水稻の例を示す。表の下から2行が実際の施肥量と水稻による窒素吸収量である。この結果では、出穂期頃から窒素吸収量が目標値を越え、生育が過剰であった。無機化土壌窒素量の実測値と施肥量、さらに第IV章で得られた施肥窒素および土壌窒素の利用率と有機化率によって、適正な水稻の窒素吸収量をもたらす施肥方法を推定した。なお、1991年は穂肥の吸収期間の日射量が平年値の80%程度と低かったので、穂肥の利用率は第

第65表 幼穂形成期から出穂期にかけての窒素吸収の増加量

(gm^{-2})

| ほ場 | 土壌由来窒素の吸収量 | | | 穂肥由来窒素 吸収量*1 | 幼穂形成期から出穂期 合計増加量*2 |
|-----|------------|------|------|-----------------|-----------------------|
| | 幼穂形成期 | 出穂期 | 増加量 | | |
| 復帰田 | 3.45 | 6.64 | 3.19 | 2.70 | 5.89 |
| 連作田 | 4.07 | 5.42 | 1.35 | 2.35 | 3.70 |

基肥窒素量は復帰田 2gm^{-2} 、連作田 4gm^{-2} 、(1989年)
 早期追肥窒素量はいずれも 2gm^{-2} 施用

*1:窒素を合計 4gm^{-2} 施肥した時の吸収量、穂肥窒素利用率は2回の平均で、復帰田
 67.4%、連作田59.4%。

*2:土壌由来窒素の増加量と穂肥由来窒素量の合計値

第66表 復帰田における施肥 (1991年の実例から)

(gm^{-2})

| 期 間 | 移植－幼形期*1 | 幼形期－出穂期 | 出穂期－成熟期 |
|----------|-----------|-----------|---------|
| 施肥窒素量 | 基肥2、早期追肥2 | 穂肥1.2+1.2 | 実肥1 |
| 土壌窒素無機化量 | 5.71 | 3.18 | 3.47 |
| プライミング効果 | 0.38 | 0.86 | 0.08 |
| 施肥窒素吸収量 | 0.78 | 1.48 | 0.64 |
| 窒素吸収量推定値 | 5.65 | 10.38 | 13.52 |
| 目標値 | 6.40 | 10.1 | 13.9 |
| 実際の施肥量*2 | 基肥2、早期追肥2 | 穂肥2+2 | 実肥2 |
| 窒素吸収量実測値 | 6.12 | 10.84 | 15.36 |

作土深 $\text{cm} \times$ 仮比重は17、下層土の量は作土1/3、利用率は作土と同じとした。
 基肥、早期追肥、穂肥2回、実肥窒素の利用率を32.1、6.8、70.6と72.6、54.6%、有機
 化率を16、4、16と20、8%とした。
 プライミング効果＝施肥窒素有機化量とした。プライミング効果を含む無機化土壌窒素の利
 用率を移植から出穂期までは90%、出穂期から成熟期までを70%とした。
 窒素吸収量の推定値は第62表と同様に計算した。

*1:幼穂形成期

*2:実際の施肥と窒素吸収量の実測値は農試118号田の施肥と窒素吸収量。

IV章で求めた結果より10%減とした。この結果得られた好適な施肥量としては、基肥窒素量が連作田の半量の 2 g m^{-2} で出発した場合、早期追肥は連作田と同量の 2 g m^{-2} 、穂肥は連作田より40%減の 1.2 g m^{-2} を2回、実肥は連作田の半量の 1 g m^{-2} となり、これで目標窒素吸収量をほぼ実現できるものと考えられる。

本研究は、コシヒカリ栽培時のより精度の高い窒素施肥技術の確立を狙いとして実施した。そして、施肥窒素利用率の変動要因、早期追肥の吸収、復帰田における施肥由来窒素と土壌由来窒素の吸収利用率、さらに無機化土壌窒素量とその利用率の変動などに関して有力な知見を得た。これらの結果は、水稻作において、無機化土壌窒素を有効に利用し、過剰施肥や窒素欠乏を防止し、良質かつ安定多収の実現を可能にするものと考えられる。さらに、この成果が水稻栽培の低コスト化、省資源にも結びつくことが期待できる。

礫質灰色低地土水田における施肥窒素の行動、利用率の変動要因、早期追肥窒素の動態、復帰田における施肥窒素・土壌窒素の水稲による吸収、富山県土壌の無機化窒素と水稲の吸収に関して検討し、水稲コシヒカリに対する施肥の方法について考察した。

1. 施肥窒素の利用率の変動とその要因

水稲への窒素施肥量を策定する際、施肥窒素の利用率は一定として計算している場合が多いが、基肥や穂肥で20%、早期追肥で15%、実肥で50%程度とかなり大きい年度間の変動を示すことを見出した。そこで、この変動を引き起こしている原因に関して重窒素トレーサー実験を行って、以下の点を明らかにした。

施肥窒素の利用率は、施肥後の平均日照時間と正の相関関係を示し、施肥後の日射量が20~40%低下すると、穂肥窒素の利用率は明らかに低下した。日射量の減少で土壌への有機化率も低下し、脱窒・流亡率が高まった。ケイ酸石灰あるいはケイ酸加里の施用は、穂肥窒素の脱窒・流亡率を無施用区の2~3倍に高め、利用率をかなり低下させた。降下浸透がゼロの条件では降下浸透が2

cm day^{-1} の場合に比べて穂肥窒素の利用率が大きく低下し、脱窒・流亡率が高くなった。穂肥の利用率では軽埴土(LiC)・埴壤土(CL)>砂埴土(SL)の傾向が認められた。

上記の要因が異なる条件で施肥窒素の吸収量を同一にするには、施肥量を20~40%余り増減する必要があることになり、利用率を一定とする施肥設計には限界があった。一方、窒素量で $1\sim 2\text{ g m}^{-2}$ の増減の範囲内であれば、施肥窒素の吸収利用率は施肥量の影響をほとんど受けなかった。また、水稻の生育量と穂肥利用率との間には、有意な関係は認められず、最高分けつ期以後に関しては、水稻の生育量が施肥窒素の利用率に及ぼす影響は小さいものと推定された。

2. 早期追肥窒素の動態と利用率

早期追肥窒素の平均利用率は、基肥窒素の利用率の1/3以下であった。そこで、重窒素を使用し、早期追肥窒素の施用後の動態を基肥と比較検討し、早期追肥が水稻生育初期に及ぼす役割および利用率を高める方策について考察した。

その結果、礫質灰色低地土で全層施用した基肥窒素は、施用後16日目には表層からかなり失われていることを認めた。早期追肥窒素は、生育初期には基肥窒素と比較し

て水稲による利用率が高く、早期追肥窒素の利用率が頭打ちとなる頃から逆に基肥窒素の利用率が高まっていった。移植後17日目の水稲が吸収した窒素量に占める早期追肥由来窒素の比率は1/3程度に達した。また、早期追肥施用区の水稲の生育は、早期追肥無施用区の水稲の生育を明らかに上まわった。

早期追肥施用時に硝化抑制剤を添加すると、脱窒・流亡率が無添加区に対して大きく減少し、水稲への利用率および土壌中への有機化率がそれぞれ増加した。早期追肥として尿素を施用すると、硫安に比べて吸収期間が長くなり、利用率が高まるのに対して、脱窒・流亡率が低下した。以上から、早期追肥は有効で、硝化抑制剤の添加または尿素での施用によって利用率を高め得ることが結論づけられた。

3. 復帰田における施肥窒素および土壌窒素の水稲による吸収

長期にわたって田畑輪換を繰り返した礫質灰色低地土復帰田における土壌窒素の無機化量は、作土、下層土とも連作田と比べて必ずしも高くはなかった。また、施肥窒素の吸収利用率は、平均すると基肥、穂肥では復帰田の方が連作田よりも高かった。早期追肥と実肥について

も、復帰田で連作田に比べて高い傾向が認められたが、年度間の変動が大きく統計的に有意な差は認められなかった。下層土に注入した重窒素の利用率には有意な差は認められなかった。

無機化土壌窒素の利用率は、無窒素条件と標肥条件ともに、復帰田が連作田と比較して高い傾向を示した。このため、復帰田の無機化土壌窒素量が連作田と比べてそれほど多くない場合でも、水稻による土壌由来窒素吸収量は復帰田の方が連作田よりも多くなった。

連作田の水稻では、標肥区における土壌由来窒素吸収量は、無窒素区における土壌由来窒素吸収量を上回る傾向が認められた。一方、復帰田では無窒素区と標肥区の土壌由来窒素吸収量がほぼ同じで、ブライミング効果が復帰田で抑制されていた。復帰田では施肥窒素の有機化率が連作田より低いことがこの要因の一つと推定された。

4. 富山県における無機化土壌窒素の実態とその水稻による吸収

富山県下の各種水田土壌における窒素の無機化経過、年度間の変動、無機化した土壌窒素の水稻による利用率などに関して考察した。

無機化土壌窒素量は土壌の粘土含有率、陽イオン交換

容量、全窒素含有率、リン酸吸収係数との間に正の相関関係が認められた。

25°C変換日数を指標として土壌窒素の無機化過程を解析した結果、無機化土壌窒素量は温度以外の要因によっても年度間で変動するものとみられた。そこで、年度間の変動を引き起こす要因を解析した結果、初期無機化量は原土中の無機態窒素量と負の相関を示した。また、春先の降水量の大小が原土中の無機態窒素量を左右する要因の一つであるとみられた。さらに、中期以後の窒素無機化速度係数と前年の作況指数との間に若干の相関を認めた。

無機化された土壌窒素の水稲による利用率は、土壌の種類によって有意な違いを示さず、平均値は70%程度であるとの結果を得た。

5. 水稲の目標窒素吸収量に向けた施肥法

水稲の収量と着粒数を、天候がそれほど良好でなく、倒伏の危険が伴う気象条件で 600 g m^{-2} を確保できる33500粒 m^{-2} と、天候が良好な年にはさらに高収量の 650 g m^{-2} を目指した35000粒 m^{-2} の2つの水準を設け、これらの着粒数を得るための、窒素吸収量の目標値を設定した。その結果、33500粒 m^{-2} を目標とした時の窒素吸収量は、

幼穂形成期で 5.3 g m^{-2} 、出穂期で 8.9 g m^{-2} 、成熟期で 11.6 g m^{-2} であった。35000粒 m^{-2} を目標とした時には、幼穂形成期で 6.4 g m^{-2} 、出穂期で 10.1 g m^{-2} 、成熟期で 13.9 g m^{-2} であった。しかし、7月3日の水稻による窒素吸収量が 5.5 g m^{-2} 、幼穂形成期で 6.5 g m^{-2} 以上になると最長稈長が90cm以上に伸びる危険性が大きく、倒伏しやすくなった。そこで、これらの値を上限値と設定した。また、黄色土では稈長が伸びやすいため、7月3日の吸収量では 3.8 g m^{-2} 、幼穂形成期では 5.4 g m^{-2} が上限値となった。

本研究で得られた、土壌窒素の無機化量と水稻による利用率および施肥窒素の利用率などの結果から、水稻の窒素吸収量を推定し、実測値とおおむね一致することを確認した。また、復帰田では、土壌窒素の無機化量と利用率や施肥窒素の利用率が高まっていた結果を利用して、適正な施肥量の試算を試み、窒素吸収量の目標値に導く施肥技術について、本研究の結果の応用への可能性を認めた。

IX 引 用 文 献

- 1) 安藤 豊・庄子貞雄・千葉隆久：水田における窒素の動態と水稻による窒素吸収について，第9報，土壌型の異なる圃場での積算有効温度示数と基肥窒素の行動，水稻による窒素吸収の関係，日作紀 47, 388～394 (1978)
- 2) 安藤 豊・庄子貞雄・相沢喜美：水田土壌中における穂肥窒素の挙動について，土肥誌 56, 53～55 (1985)
- 3) 安藤 豊・藤井弘志・佐藤俊夫・荒垣憲一・中西政則・佐藤之信：沖積水田土壌の地力窒素の無機化モデルについて，土肥誌 60, 1～7 (1989)
- 4) 安藤 豊・三原千加子：水田土壌の C E C が追肥窒素挙動に及ぼす影響，土肥学会要旨集 37, 105 (1991)
- 5) 安藤 豊・曲直瀬知子：追肥尿素の水田土壌中での挙動，土肥学会要旨集 38, 112 (1992)
- 6) BREMNER, J. M. : 施肥窒素に伴う浅層地下水の硝酸汚染の軽減技術，土肥誌 58, 622～628 (1978)
- 7) FERRANTE, B. D., VORM, P. V. D. and DIEST, A. V. : Comparative studies on the usefulness of ammonium sulphate and urea as fertilizers for lowland rice., Fert. res. 10, 119～133 (1986)

- 8) 藤井弘志・安藤豊・佐藤俊夫・荒垣憲一・中西政則・佐藤之信：山形県庄内地域（グライ土壌）の地力窒素の無機化について，土肥誌 60，8～14（1989）
- 9) GREENWOOD, D. J., KUBO, K., BURNS, I. G., and DRAYCOTT, A.: Apparent Recovery of Fertilizer N by Vegetable Crops, Soil Sci. Plant Nutr. 35, 367～381（1989）
- 10) 原田登五郎：水田土壌の有機態窒素の無機化とその機構に関する研究，農技研報 B 9，167～185（1959）
- 11) 長谷部亮・飯村康二：北陸地域強グライ強粘質水田土壌における酸化層・還元層の分化発達過程，土肥誌 54，273～276（1983）
- 12) 長谷川和久：複合肥料に関する研究と応用，養賢堂，東京，46～54（1988）
- 13) 長谷川清善・小林正幸・宮崎秀也・中田均：水田における施肥窒素の効率的利用，第2報，圃場における施肥窒素の動向について，滋賀農試報 20，8～19（1978）
- 14) 廣川智子：水稻に対する施肥窒素の量と吸収利用率の関係，土肥学会中部支部要旨集 62，10（1990）
- 15) 廣川智子・伊藤純雄・北川靖夫：水稻による施肥窒素の吸収利用率と施肥後の気温及び日照との関係，富

- 山県農技セ研報 10, 11~17 (1991)
- 16) 廣川智子・伊藤純雄・北川靖夫：礫質灰色低地土長期輪換田におけるコシヒカリの施肥窒素及び土壌窒素の吸収，土肥誌 63, 550~558 (1992)
- 17) 廣川智子・伊藤純雄・北川靖夫：各種土壌における施肥窒素及び土壌窒素のコシヒカリによる吸収とその変動要因について，富山県農技セ研報 13, 11~20 (1992)
- 18) 市田俊一・遊座次夫：地力培養による田畑輪換水田の収量性について，青森農試研報 26, 139~160 (1982)
- 19) 五十嵐恒：適正浸透量について，農業土木研究 24, 311~312 (1957)
- 20) 今泉諒俊・北村秀教：土壌窒素発現量に基づく水稻の施肥適量の推定，農及園 64, 939~944 (1989)
- 21) 今泉吉郎：珪カル，土壌肥料全編，養賢堂，東京，726~739 (1958)
- 22) INUBUSHI, K., WADA, H., and TAKAI, Y.: Easily Decomposable Organic Matter in Paddy Soil, Soil Sci. Plant Nutr. 31, 563~572 (1985)
- 23) 伊藤滋吉・伊良波幸和・飯村康二：泥炭岩土壌の性質と粘土鉱物，北陸農試報 20, 117~134, (1977)

- 24)伊藤滋吉・飯村康二：北陸地方の細粒質強グライ土
壌における窒素の揮散と脱窒，北陸農試報 28，57～
84 (1986)
- 25)伊藤滋吉・飯村康二：細粒質強グライ土水田におけ
る窒素の動態とガス代謝，北陸農試報 32，1～41
(1990)
- 26)甲斐秀昭：水田土壌中における窒素の形態変化と有
効性，水田土壌学，川口桂三郎編，講談社，東京，
229～243 (1978)
- 27)金田吉弘・児玉徹・長野間宏：八郎潟干拓地の輪換
水田における窒素吸収パターンの特徴，土肥誌 60，
127～133 (1989)
- 28)金田吉弘・児玉徹・長野間宏：輪換水田における水
稲の下層土からの窒素吸収量の評価と無機化窒素量の
推定，土肥誌 60，399～405 (1989)
- 29)狩野広美・米山忠克・熊沢喜久男：発光分光分析法
による重窒素の定量法について，土肥誌 45，549～
559 (1974)
- 30)勝見太：水田土壌中における施肥窒素の行動，福井
農試報 9，1～13 (1972)
- 31)北田敬宇・宮川修・塩口直樹：水稻の理想的な窒素
吸収パターンと土壌窒素無機化予測によるシステム施

肥法，土肥誌 62，585～592（1991）

- 32) 北村秀教：土壤窒素発現予測による施肥診断，農山漁村文化協会編，稲作大百科Ⅲ，496～501（1990）
- 33) 金野隆光・杉原進：土壤生物活性への温度影響の指標化と土壤有機物分解への応用，農環研報 1，51～68（1986）
- 34) 甲木章・福田守・徳安雅行：水稻生育期間における土壤窒素の発現様式，第2報，前歴の異なる水田の土壤窒素発現量の推定，土肥学会要旨集 35(Ⅱ)，369（1989）
- 35) 河野通佳：北陸の自然と農業，北陸の農業散歩，日本土壤肥料学会昭和60年度大会運営委員会，1～6（1985）
- 36) 小山雄生： ^{15}N 利用による水田窒素肥沃度の実際と生産力，土肥誌 46，260～269（1975）
- 37) 蔵本正義・小菅伸郎・高橋和司：土壤養分分析法，養賢堂，東京，34～38（1970）
- 38) 前田乾一：水田に施用された窒素の行動の定量的評価，農研センター研報 1，121～192（1983）
- 39) 松島省三：稲作の改善と技術，養賢堂，東京，17～24（1975）
- 40) MENGEL, K. and VIRO, M. : The Significant of Plant

Energy Status for the Uptake and Incorporation
of NH_4 Nitrogen by Young Rice Plants, Soil Sci.
Plant Nutr. 24, 407~416, (1978)

41) 陽捷行：施肥と大気組成変化およびその制御技術，
肥料 26(51)，46~50 (1988)

42) 深山政治・岡部達雄：稚苗移植水稻の施肥法とその
地域性，第1報，水稻の生育時期別最適窒素保有量よ
りみた窒素の施用法，千葉農試研報 20，111~131
(1979)

43) 深山政治・岡部達雄：稚苗移植水稻の施肥法とその
地域性，第2報，稚苗移植水稻に対する窒素施用法の
地域性，千葉農試研報 21，35~60 (1980)

44) 深山政治：水稻の最適窒素保有量に基づく新しい施
肥基準策定法に関する研究，千葉農試特報 15，1~92
(1988)

45) 茂木惣治・鶴野慶吉：稲・麦わら施用水田の土壤肥
料的研究，第1報，稲わら施用水田の施肥窒素の吸収
利用について，栃木農試研報 25，7~16 (1979)

46) 棟方研・川崎勇・仮谷桂：気象および稲体要因から
みた水稻生産力の定量的研究，中国農試報 A 14，59
~96 (1976)

47) 西沢良一・西川吉和・中田均：機械移植水稻の効率

- 的施肥法に関する研究，第2報，後期追肥について，
滋賀農試研報 21，41～49（1980）
- 48)岡島秀夫・木曾誠二：土壤窒素の動態に対する稲残
根の影響，土肥誌 51，107～112（1980）
- 49)奥田東・高橋英一：作物に対するケイ酸の栄養生理
的役割について，第6報，水稻の鉄吸収および根の酸
化力におよぼすケイ酸施用の影響，土肥誌 33，59～
64（1962）
- 50)鬼鞍豊・吉野喬・前田乾一：稲作期における土壤窒
素の有効化過程，土肥誌 46，255～259（1975）
- 51)大竹俊博：山形県におけるダイズ跡輪換田の施肥法
について，土肥誌 59，504～507（1988）
- 52)西天浩・山室成一：低湿重粘土水田における田畑輪
換，農業技術 43，385～389（1988）
- 53)斎藤雅典：零次反応モデルによる畑土壤の窒素無機
化量の推定，東北農試研報 78，155～160（1988）
- 54)坂上朗・橋本重久：施肥来歴を異にせる土壤に於け
る尿素の分解について，土肥誌 23，29～31（1952）
- 55)作物分析法委員会編：栽培植物分析測定法，養賢堂，
東京，63～67（1975）
- 56)関谷宏三：土壤養分分析法，養賢堂，東京，251～
253（1970）

- 57) 関 矢 信 一 郎 ・ 本 谷 耕 一 : 水 田 土 壤 中 の 窒 素 の 行 動 に
関 する 研 究 , - と く に 有 機 物 と の 関 係 に つ い て - , 東
北 農 試 研 報 36, 1 ~ 25 (1968)
- 58) 関 矢 信 一 郎 ・ 志 賀 一 一 : 北 海 道 に お け る 水 田 土 壤 中
の 窒 素 の 動 態 と 水 稻 の 窒 素 吸 収 パ タ ー ン に つ い て , 土
肥 誌 46, 280 ~ 285 (1975)
- 59) 城 下 強 ・ 石 居 企 救 男 ・ 高 橋 和 夫 ・ 金 子 淳 一 : 田 畑 輪
換 に 関 する 土 壤 肥 料 学 的 研 究 , 関 東 東 山 農 試 研 報 16,
50 ~ 96 (1960)
- 60) 庄 子 貞 雄 ・ 和 田 源 七 ・ 斎 藤 公 夫 ・ 新 保 到 ・ 高 橋 重 郎
: 水 田 に お け る 窒 素 の 動 態 と 水 稻 に よ る 窒 素 吸 収 に つ
い て 第 2 報 基 肥 窒 素 の 土 壤 中 に お け る 行 動 , 日 作 紀
40, 281 ~ 286 (1971)
- 61) 庄 子 貞 雄 ・ 前 忠 彦 : 無 機 養 分 と 水 の 動 態 , 作 物 の 生
態 生 理 , 文 永 堂 , 東 京 , 97 ~ 132 (1984)
- 62) 庄 子 貞 雄 ・ 野 木 照 修 ・ 高 橋 重 郎 ・ 和 田 源 七 : 水 田 に
お け る 窒 素 の 動 態 と 水 稻 に よ る 窒 素 吸 収 に つ い て , 第
8 報 , 圃 場 条 件 の 異 な る 場 合 の 基 肥 窒 素 の 行 動 と 窒 素
吸 収 の 比 較 , 日 作 紀 45, 226 ~ 231 (1976)
- 63) 住 田 弘 一 : 水 田 土 壤 の 窒 素 無 機 化 量 と 施 肥 - 東 北 地
方 に つ い て - , 水 田 土 壤 の 窒 素 無 機 化 と 施 肥 , 博 友 社,
東 京 , 98 ~ 109 (1990)

- 64) TA, T. C., and OHIRA, K., : Effects of Temperature and Light Intensity on the Uptake and Assimilation of ^{15}N -labeled Ammonium and Nitrate in Indica and Japonica Rice Plants, Soil Sci. Plant Nutr. 28, 91~98 (1982)
- 65) 高橋重郎・和田源七・庄子貞雄：水田における窒素の動態と水稻による窒素吸収について，第6報，温度が水稻の窒素吸収および土壌中のアンモニア態窒素の消長におよぼす影響，日作紀 45, 213~219 (1976)
- 66) 武田敏昭・佐藤紀男・丹治芳広・小沢一夫・安藤豊：水稻生育の地域性と対応技術組立に関する解析的研究，福島農試研報 23, 19~41 (1984)
- 67) 武田敏昭：福島県における水稻の生育診断および生育予測技術開発に関する土壌肥料学的研究，福島農試特別報告 3, 1~118 (1986)
- 68) 丹野文雄・武田敏昭：水稻の栄養診断と予測技術に関する研究，第5報，総合計量化方式によるコシヒカリ、ササニシキの生育予測，福島農試研報 25, 21~48 (1986)
- 69) 鳥山和伸・飯村康二：北陸地域の細粒強グライ水田作土における土壌窒素供給力の季節変動，土肥誌 58, 671~676 (1987)

- 70) 鳥山和伸・関谷信一郎・宮森康雄：湛水前の土壤乾燥が土壤窒素の無機化量に及ぼす影響の定量的把握，土肥誌 59，531～537（1988）
- 71) 鳥山和伸：水稻の生育予測と窒素無機化，日本土壤肥料学会編，水田土壤の窒素無機化と施肥，博友社，東京，125～156（1990）
- 72) 富山県農業技術センター：農林水産省指定土壤肥料試験成績書，昭和61年度，農業試験場・機械営農課，22～24（1986）
- 73) 富山県・富山地方気象台：昭和53年度～平成2年度、富山県農業気象旬報（1978～1990）
- 74) 富山県農業技術センター：土壤保全対策事業成績書，平成元年度，農業試験場・土壤肥料課，121～168（1990）
- 75) 富山県農業水産部：平成4年度水稻・大麦・大豆栽培技術指針（1992）
- 76) 豊田春男：窒素肥料 尿素，植物栄養・土壤・肥料大事典 IV 編 6，養賢堂，東京，1099～1102（1976）
- 77) 上野正夫・中西政則・大竹俊博：土壤窒素有効化パターンの解析と水稻の窒素栄養診断法，農及園 63，1053～1057，1171～1174，1267～1270，1389～1393（1988）

- 78)上野正夫・佐藤之信・熊谷勝巳・大竹俊博：水田の
乾土効果発現量の予測と水稻の生育反応，土肥誌 60，
167～171 (1989)
- 79)和田源七：水稻収量成立におよぼす窒素栄養の影響，
農技研報 A 16，27～167 (1969)
- 80)和田源七・庄子貞雄・高橋重郎：水田における窒素
の動態と水稻による窒素吸収について，第1報，基肥
窒素の吸収，日作紀 40，275～280 (1971)
- 81)和田源七・庄子貞雄・高橋重郎・斎藤公夫・新保到
：水田における窒素の動態と水稻による窒素吸収につ
いて，第3報，追肥窒素の土壤中における行動ならび
に水稻による吸収，日作紀 40，287～293 (1971)
- 82)渡辺巖：水田土壌における有機物の動態(5)、土壌窒
素代謝研究に重窒素を使用する時の問題点，農及園
63，1348～1352 (1988)
- 83)渡邊公吉：北海道道央地域における復元田の土壌特
性と施肥法，土肥誌 57，512～514 (1986)
- 84)WETSELAAR, R. and FARQUHAR, G. D. : Nitrogen Losses
from Tops of Plants, ADVANCES IN AGRONOMY 33,
263～302 (1980)
- 85)Yamaguchi, J. and Tanaka, A. : Quantitative Observa-
tion on the Root System of Various Crops Growing

in the Field. Soil Sci. Plant Nutr. 36, 483~493

(1990)

- 86) 山本 富三・久保田 忠一・真鍋 尚義：速度論的方法による水稲生育期間中の土壌窒素無機化量の推定，土肥誌 57, 487~492 (1986)
- 87) 山室 成一：水田土壌中における施肥窒素の有機化，脱窒および水稲による吸収，土肥誌 52, 141~148 (1981)
- 88) 山室 成一：57年度農林水産省北陸農業試験場土壌肥料第1、第2研究室試験成績，18~20 (1982)
- 89) 山室 成一：湿田と乾田における施肥および土壌無機化窒素の有機化、脱窒および水稲による吸収，土肥誌 55, 557~563 (1984)
- 90) 山室 成一：水田における窒素の無機化と有機化、脱窒、吸収の動態に関する ^{15}N トレーサー法の理論的アプローチと水稲窒素吸収量予測，九州農試報 27, 1~64 (1991)
- 91) 山根 一郎：土壌学の基礎と応用，農文協，東京，30~31 (1960)
- 92) 吉田 作松・篠木 誓一：日本における月平均全天日射量およびその年々の変動度マップの作成，天気 25, 357~389 (1978)

- 93) 吉田 昌一：稲作科学の基礎，博友社，東京，167～
168 (1986)
- 94) 吉野 喬・出井嘉光：土壤窒素供給力の有効積算温度
による推定法について，農事試研報 25，1～62 (1977)
- 95) 吉野 喬・出井嘉光：水田土壤における施肥窒素の行
方および窒素肥料が土壤窒素無機化に及ぼす影響，農
事試研報 28，91～113 (1978)